



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



ITEL
INSTITUTO TECNOLÓGICO EL LLANO
AGUASCALIENTES

APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE Y BIOTECNOLÓGICO DEL NOPAL



*Compendio de información que generan profesores e investigadores de
diversas Instituciones de México.*



Facultad de
Agronomía



SNICS

SERVICIO NACIONAL DE
INSPECCIÓN Y CERTIFICACIÓN
DE SEMILLAS

TÍTULO DE LA OBRA:

APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE Y BIOTECNOLÓGICO DEL NOPAL.

Editores de la obra:

Red Nopal 2024. Aprovechamiento sustentable y biotecnológico del nopal, un recurso fitogenético de México. Tecnológico Nacional de México (TecNM) y Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). El Llano Aguascalientes.

Cita correcta de capítulo:

[Autores]. Título del capítulo. In: Aprovechamiento sustentable y biotecnológico del nopal. TecNM Campus El Llano Aguascalientes (TecNM-ITEL) y Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS-SADER). El Llano Aguascalientes, Méx. pp. (páginas consultadas).

Para la presente edición, TecNM-Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, Km 18 carr. Ags.,-San Luis Potosí, Méx. CP: 20330.

Diseño y Formación:

Ana Sofía Ocampo Olivares, Cuauhtémoc Rodríguez Silva y Erika Silva Campos.

Fotografías:

De Portada y las No ubicadas en Capítulos corresponden al Depositario Nacional de Opuntia, al Centro Nacional de Recursos Genéticos y al Laboratorio de Bioprocesos del ITEL.

Edición con fines académicos y de investigación.

ISBN: 978-607-7912-51-4

Primera edición 2024.

Hecho en México.

Printed in Mexico.

D. R. Se autoriza la reproducción total o parcial de esta publicación bajo la autorización del Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes.

Directorio

Tecnológico Nacional de México, Campus El Llano Aguascalientes (TecNM-ITEL)

Km 18 Carretera Ags.-San Luis Potosí, sin número.
Municipio de El Llano, 20330.
Aguascalientes, México.
Tel. 449 9621100
<https://llano.tecnm.mx>

Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas dependiente de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SNICS-SADER).

Av. Guillermo Pérez Valenzuela 127
Del Carmen Coyoacán 04100
Ciudad de México
Tel: 5541960535
<https://www.gob.mx/snics>

Facultad de Agronomía | Universidad Autónoma de Nuevo León

Francisco I. Madero s/n, Hacienda el Canada, Cd General Escobedo, Nuevo León, C.P.
66050. +52 81- 13-40 4399
www.uanl.mx, <http://agronomia.uanl.mx>

Centro Nacional de Recursos Genéticos/INIFAP

Boulevard de La Biodiversidad #400, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, Mx. Tels.: 553
871 87 00 Ext.84820 378 106 50 20 ext. 5111
www.cnrg.inifap.gob.mx

Escuela de Agronomía La Salle Bajío | León

Avenida Universidad 602, 47587 León, Guanajuato
442 631 8746
www.lasallebajio.edu.mx

PRESENTACIÓN (TecNM-ITEL)

Este libro es resultado del trabajo y experiencia acumulada a través del tiempo en los campos de la formación agronómica, biológica, biotecnológica y química de los profesores e investigadores que participan en esta obra. Refleja el compromiso, disciplina y continuidad que la academia institucional le confiere al estudio de esta planta que es parte de la identidad nacional. Este esfuerzo se realiza con el objetivo de transmitir a las nuevas generaciones la importancia de la conservación y aprovechamiento sustentable de esta planta la cual ofrece una amplia posibilidad de beneficios. Para México es preponderante la formación técnica y científica de sus habitantes para así tener más posibilidades de conocimiento y sensibilidad de los recursos biológicos que crecen de manera natural en su entorno. Considerando lo anterior, en esta obra, se abordan temas sobre origen, diversidad, banco de germoplasma, conservación, cultivo tradicional y por técnicas especializadas, así como la manera de identificar, producir (de manera inocua y segura) y aprovechar sus componentes en beneficio de la alimentación y la salud. Por otro lado, nuestra Institución, en aras de la formación académica de nuestros estudiantes ha realizado eventos académico-científicos (Congresos nacionales e internacionales dentro de la plataforma AgrobioTecNM) lo que ha permitido compartir experiencias con investigadores reconocidos por su alta especialización en el tema de nopal. De esta forma, el presente libro es un producto de la interacción inherente surgida en estos eventos. Expresamos agradecimiento infinito a todos nuestros colaboradores y amigos.

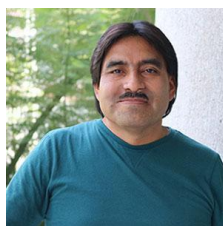
**Lizeth Rodríguez Gómez es directora del Instituto Tecnológico El Llano
Aguascalientes y colaboradora en la creación e implementación de líneas de acción
en fortalecimiento a la Agenda Estratégica del TecNM para la Autosuficiencia
Alimentaria y el rescate del campo mexicano**

PRESENTACIÓN (SNICS)

Los recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura constituyen la base biológica de la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial. Durante los últimos 20 años se han realizado diversas estrategias a nivel mundial y nacional para fomentar la conservación y utilización sustentable de estos recursos; de manera particular la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (AGRICULTURA) a través del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), han realizado esfuerzos en este sentido a través de la Conformación de 45 Redes, las cuales atienden a los principales cultivos con centro de origen y diversificación en nuestro país, entre ellos el género *Opuntia* con la “Red de Nopal”. El nopal no solo es símbolo de identidad para los mexicanos, sino también representa un recurso genético con alto potencial alimenticio, industrial y medicinal, por su alta adaptación a lugares con poca disponibilidad de agua y suelos pobres. En México su mayor producción y consumo es como hortaliza, de acuerdo a datos del Servicio de Información Agroalimentario y Pesquero (SIAP, 2023), en 2022, se sembraron 12 mil 491 hectáreas y se obtuvo una producción de 872 mil toneladas de nopalitos en fresco; no obstante, aún falta explorar el gran potencial de este cultivo, si consideramos la gran diversidad de especies que existen en el país. Es así como el presente libro contribuye al fortalecimiento de la sensibilización de la opinión pública sobre la importancia de este importante Recurso Fitogenético, además, genera información de gran utilidad en conservación *in situ* y *ex situ* del nopal (diversidad, bancos de germoplasma y criterios de clasificación); en cuanto a la utilización sostenible, brinda información importante sobre algunas técnicas especializadas para su conservación, reproducción y la extracción de sus componentes principales que serán de utilidad para industria alimenticia y la salud humana. Sin lugar a duda esta publicación permite explorar los avances en la investigación científica sobre este importante cultivo en nuestro país. Así mismo, refleja la colaboración interinstitucional e interdisciplinaria de los diferentes autores e investigadores que colaboraron y compartieron sus logros para generar esta obra.

Nancy Yazmín Hernández Nicolás San Juan es Directora del Subcomité de Recursos Fitonéticos para la Alimentación y la Agricultura.

SOBRE LOS AUTORES



Dr. Andrés Cruz Hernández

Escuela de Agronomía. Universidad De La Salle Bajío

Licenciado en Biología (ENEP-Iztacala, UNAM, 1988), Maestría en Ciencias con especialidad en Biotecnología de plantas (CINVESTAV-Irapuato, 1993), Doctor en Ciencias con especialidad en Biotecnología de Plantas (CINVESTAV-Irapuato, 1998), Postdoctorado (University of Queensland, Australia, 1999). Investigador nacional nivel I (2021-2024). Ha publicado más de 100 artículos, ha graduado a 32 estudiantes de Licenciatura, Maestría y Doctorado, dos premios nacionales de estudiantes de licenciatura. Revisor invitado de artículos en Revistas internacionales, miembro del comité editorial de la revista Industrial Crops and Products, evaluador de proyectos de agencias Mexicanas (CONAHCyT) y Latinoamericanas. Presidente de la Red Biónica A.C. Profesor Investigador de tiempo Completo de la Escuela de Agronomía en la UDLSB.

email: andrex1998@hotmail.com



Carlos Iván Cruz Cárdenas

Centro Nacional de Recursos Genéticos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CNRG-INIFAP)

Ingeniero Biotecnólogo por el Instituto de Biociencias de la Universidad Autónoma de Chiapas (IBC-UNACH) (2010) y Doctor en Ciencias Biológicas con especialidad en Bioquímica y Biología Molecular de Plantas por el Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C. (CICY) (2015). Investigador Titular del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), adscrito al Laboratorio de Recursos Genéticos Agrícola-Forestal, Colección de Semillas del Centro Nacional de Recursos Genéticos CNRG. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) Nivel 1. Sus líneas de investigación son: caracterización morfo-histológica, fisiológica, bioquímica y molecular de plantas agrícolas y forestales, El desarrollo de protocolos de conservación a mediano y largo plazo de semillas.

email: cruz.ivan@inifap.gob.mx



Eduardo Alejandro García-Zambrano

Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Es Ingeniero Agrónomo Fitotecnista (1983) con Maestría en Ciencias en Producción Agrícola por la Universidad Autónoma de Nuevo León (2002). Ha publicado más de 22 artículos científicos a nivel nacional e internacional en revistas de rigor científico relacionados con la conservación de recursos genéticos, estimando la diversidad genética de nopal y xoconostle. Lo anterior le ha permitido ser integrante del Cuerpo Académico de Agrobiotecnología (Consolidado), tener reconocimiento con Perfil Deseable (ProDEP) en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León desde el 2004. Su formación académica le ha permitido ser Profesor de Tiempo Completo (FA-UANL) y especializarse en Métodos estadísticos, Diseños experimentales y Análisis multivariado, además de ser maestro fundador de la Licenciatura en Ingeniería en Biotecnología

email: eduardo.garciazb@uanl.edu.mx, eagarcil@hotmail.com



Héctor Silos Espino

TecNM El Llano Aguascalientes

Es Ing. Agrónomo Fitotecnista por el Instituto Tecnológico de Villa de Arista S. L. P., MC. en Biotecnología Vegetal por el Instituto Tecnológico de El Llano Aguascalientes y Dr. En Ciencia de los Alimentos por la Universidad Autónoma de Querétaro. Ha publicado más de 35 artículos científicos en revistas de rigor científico relacionados con la propagación *in vitro*, valor nutricional y diversidad genética de plantas (maíz, nopal, maguey, ajo, durazno, maíz, guayaba). Lo anterior le ha permitido ser integrante del Cuerpo Académico Biotecnología para plantas del semidesierto (Consolidado), tener reconocimiento con Perfil Deseable en el Tecnológico Nacional de México, del Sistema Nacional de Investigadores (nivel I) desde el 2015 y coordina la Red Nopal desde el 2021.

email: hector.se@llano.tecnm.mx

ÍNDICE GENERAL

Capítulo	Tema	Página
Sección: Tendencias de la investigación y criterios de clasificación del nopal.		
1	Escenario global y tendencias de la investigación científica sobre nopal (<i>Opuntia</i> spp): Visualización y análisis bibliométrico. Bravo Vinaja, Á. y Méndez Gallegos S. de J.	1
2	Criterios para la identificación del nopal. Ortiz Robles Ma. D., Silos Espino H., Flores Benítez S., Valera Montero L. L., Perales Segovia C., López Muraira I. G. y Cruz Cárdenas C. I.	36
3	Depositorio Nacional de Opuntia: Vínculo para el desarrollo e innovación en nopal. Gallegos Vázquez C. y Gallegos Luevano N. A.	58
4	Genómica y transcriptómica aplicada al género <i>Opuntia</i> . Cruz-Cárdenas C. I., Aragón-Magadán M. A. y Guzmán-Rodríguez L. F.	77
Sección: Herramientas bioquímicas y moleculares en el nopal.		
5	Estimación de la diversidad genética de <i>Opuntia</i> spp. usando marcadores moleculares tipo RAPD y AFLP. García Zambrano E. A.	89
6	Manejo poscosecha de tuna y nopal verdura. Barraza-Elenes C., Calderón-Castro A., Gómez-Favela M.A., Mondragón-Portocarrero A.C. y Carrillo-López A.	111
7	MicroRNAs para el estudio de la maduración de la tuna. Morales Alonso S. I., Arellano Perusquia A. A., Bañuelos Hernández B., Albarrán Tamayo F. y Cruz Hernández A.	129
8	Estrategia por PCR para determinar la presencia del agente causal del engrosamiento del cladodio. De la Torre Pizaña M. Á., Perales Segovia C., Flores Benítez S., Valera Montero L. L. y Silos Espino H.	140
Sección: Cultivo de tejidos vegetales del nopal		
9	Propagación <i>in vitro</i> de dos variedades de nopal <i>Opuntia ficus indica</i> L. Ojeda-Zacarías Ma. del C. y Pérez-Sánchez R. E.	149

10	El cultivo de tejidos vegetales y su posible aplicación para producir componentes de interés de nopal. Silos Vega H.X., Escalera García R., Mocada Gonzáles D., Ortiz Morales M., Valera Montero L. L. Flores Benítez S., Guzmán Maldonado H. S., Rodríguez Cabrera B., Escalante García N. y Olvera Gonzáles E.	159
----	---	-----

Sección: Métodos de extracción y función de los componentes principales del nopal.

11	Métodos extractivos de metabolitos principales del nopal: Avances y aplicaciones. Flores Martínez H. y León Campos C.	165
12	Efectos terapéuticos del nopal. González Maldonado Ma. G., Rodríguez Gómez L. y Silos Espino H.	190

Sección: Aprovechamiento del nopal

13	Cultivares de nopal utilizados en la cría de cochinilla <i>Dactylopius coccus</i> costa (hemiptera: dactylopiidae). Méndez-Gallegos S. de J., Ortega-Espinoza, J. y Magallanes-Quintanar R.	213
14	El nopal (<i>Opuntia</i> spp.) en la alimentación animal. Mejía Haro I. González Reyes M., Tirado González D. N. y Aréchiga Flores C. F.	229
15	Efecto de las condiciones de secado por aspersión sobre las propiedades fisicoquímicas del mucílago de nopal (<i>Opuntia</i> spp.). Lara Hernández, J. J., López Muraira I. G., Farías Cervantes V. S., Chávez Rodríguez A. y Andrade González I.	239

INTRODUCCIÓN POR LOS EDITORES

Este Libro es el resultado de una de las propuestas emergidas en reuniones de trabajo durante el año 2022 entre integrantes de la Red Nopal e invitados, el Personal Administrativo del Subcomité de Recursos Fitogenéticos para la Agricultura y la Alimentación (Leobigildo Córdoba Téllez, Nancy Yazmín Hernández Nicolás, Cesar Ríos Santos y Julio Cesar Pérez de la Cerda) y las Autoridades educativas del TecNM/Campus el Llano Aguascalientes (Lizeth Rodríguez Gómez y Erika Silva Campos). Las instituciones y personas antes mencionadas unieron esfuerzos con el objetivo de integrar documentación relevante e importante relacionada al nopal para fomentar su conservación y aprovechamiento sustentable por medio de la biotecnología y otras técnicas que deben ser conocidas entre la comunidad académica y especialistas. Esta obra incluye tópicos sobre tendencias de la investigación y criterios de clasificación, herramientas bioquímicas y moleculares, cultivo de tejidos vegetales, métodos de extracción, función de los componentes principales y formas de aprovechamiento del nopal.

Es un documento creado por expertos en los temas; los cuales describen sus resultados, experiencias, y al lector le permitirá seleccionar algún tema (o temas) de su interés; para que de esta manera tenga la gran oportunidad de concebir y apropiarse de información valiosa en relación al nopal. También es un documento que muestra las investigaciones y aplicaciones actuales que debe tener o deberían explorarse con mayor profundidad.

La oportunidad de crear esta obra permitió la coincidencia de las ideas y de trabajo conjunto entre profesores e investigadores de diversas instituciones y que tienen la clara intención de involucrar a más personas para el conocimiento y conservación del nopal.

Por todo lo anterior, agradecemos infinitamente a Todos los Colaboradores en este libro.

Tendencias de las investigaciones en nopal.



I. Resumen

A continuación, se explica el comportamiento de la producción científica sobre nopal (*Opuntia* spp) mediante indicadores bibliométricos en el periodo de 1900-1922. Se consultaron bases de datos de Science Citation Index Expanded (SCIE) y Social Sciences Citation Index (SSCI), pertenecientes al Web of Science (WoS). Con dicha información se obtuvieron indicadores uni y multidimensionales (producción, citación y relacionales), empleando los programas Excel[®], Bibliometrix[®] y VOSviewer[®]. Durante el periodo en estudio se logró extraer un total de 4320 documentos sobre la temática abordada. Los resultados mostraron un dinamismo importante, con un incremento constante y progresivo, acentuándose durante los últimos cinco años, en los que se recuperaron 2704 documentos, que corresponden a 63 % de los documentos indizados, lo que denota el interés y relevancia del tema. El artículo científico original destacó como principal medio de difusión. La mayor parte de la producción científica se generó en el continente americano; el liderazgo científico recayó en P. S. Nobel de EE.UU. Los registros recuperados provienen principalmente de México, EE.UU., Italia y Brasil; pero no son quienes reciben el mayor número de citas por documento. La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) es la referente en el número de publicaciones, pero fue la Universidad California quien registró el mayor número de citaciones. Los autores seleccionaron, principalmente, revistas anglosajonas para publicar sus resultados de investigación, destacando el *Journal of The Professional Association For Cactus Development* y el *Journal of Arid Environments*, lo que favoreció su visibilidad. Las tendencias de investigación fueron: *actividad antioxidante*, *compuestos fenólicos*, *mucílago*, resaltando sus beneficios nutraceuticos, biológicos y funcionales. Es notoria la escasa colaboración internacional entre autores y la contribución a la temática por investigadores generada en otros ámbitos geográficos. Los resultados también podrían coadyuvar a la toma de decisiones para focalizar y orientar investigaciones futuras relevantes para la sociedad.

II. Introducción

Durante los últimos 20 años el nopal *Opuntia* spp (Caryophyllales: Cactacea), una planta endémica del continente americano, particularmente de Norteamérica (Griffith, 2004) y del suroeste de Sudamérica (Majure *et al.*, 2012) se ha dispersado en otros ámbitos rápidamente. De acuerdo con Rebman y Pinkaba (2001) existen tres centros de diversidad: (1) la parte central de México, desde donde los cactus norteamericanos han evolucionado, 2) la región andina, y 3) Brasil. Estos mismos autores destacan que hay un subcentro que se extiende desde el norte de América del Sur, hacia el norte a través de las Antillas y las Indias Occidentales a Florida. El género también se encuentra ampliamente distribuido en algunas regiones áridas y semiáridas de Europa, África, Asia, Australia y América (Ciriminna *et al.*, 2017; Madrigal-Santillán *et al.*, 2022), debido a los beneficios socioeconómicos, agronómicos y ecológicos, así como por sus actividades funcionales, nutraceuticas y biológicas (Abbas *et al.*, 2022). Dada la vulnerabilidad de algunos sistemas productivos de importancia económica ante el impacto de la crisis climática, el nopal por sus características morfológicas y fisiológicas, su facilidad de reproducción, rápido crecimiento, capacidad de adaptación, resiliencia, alta eficiencia en el uso de agua, resistencia a temperaturas extremas y alta productividad, aunado a su bajo requerimiento de insumos, es considerada una de las especies propicias para ocupar aquellos espacios donde otros cultivos no podrán prosperar.

Lo anterior ha propiciado, durante las últimas décadas, un gran dinamismo y ha despertado el interés en la comunidad científica internacional (Ramadan *et al.*, 2021) para la generación de nuevos conocimientos sobre esta planta, que se ha reflejado en un incremento exponencial en la producción científica a nivel internacional, durante los últimos 20 años (Bravo-Vinaja y Méndez-Gallegos, 2016). Ante la relevancia de la temática, se requiere un monitoreo continuo del estado del arte de la investigación. En este contexto, durante los últimos años se han publicado excelentes revisiones sobre temas específicos relacionados al nopal tales como: la composición química y sus beneficios potenciales a la salud (Silva *et al.*, 2021; Abbas *et al.*, 2022; Daniloski *et al.*, 2022), forraje alternativo para la producción ganadera sostenible (Pastorelli *et al.*, 2022), la obtención de fibra y su potencial para obtener materiales sustentables (Castellano *et al.*, 2021), aplicaciones y propiedades farmacológicas de la cáscara (Manzur-Valdespino *et al.*, 2022), su valor nutritivo (Dubeux *et al.*, 2022), sus actividades antimicrobianas (Hikal *et al.*, 2021), y por los servicios ecosistémicos que proporciona (Stavi, 2022), entre otros. Sin embargo, se requiere de una sistematización rigurosa que permita identificar con precisión las tendencias de la investigación y los temas emergentes, a través de herramientas como la bibliometría (Pritchard, 1969).

La bibliometría como método de la cienciometría, permite conocer el comportamiento de la producción científica y la actividad de sus autores dentro de cualquier área de investigación. Para ello, utiliza herramientas de medida e indicadores que proporcionan información sobre los resultados de los estudios mediante el análisis estadístico de datos cuantitativos obtenidos a partir de los artículos publicados y la literatura científica de cualquier campo del conocimiento. De igual manera permite estudiar el comportamiento estadístico a lo largo del tiempo y analizar la actividad científica, desde diferentes perspectivas (Velázquez López *et al.*, 2013). El análisis bibliométrico es un método popular y riguroso para explorar y analizar grandes volúmenes de datos científicos; también permite descubrir la tendencia evolutiva de un campo específico, mientras brinda información sobre las áreas emergentes en ese campo (Donthu *et al.*, 2021). Debido a ello, la bibliometría se ha convertido en una herramienta esencial para evaluar y analizar la producción científica, la cooperación entre universidades, el efecto de la financiación estatal de la ciencia en el rendimiento de la investigación y el desarrollo nacional y la eficiencia educativa, entre otras aplicaciones (Moral-Muñoz *et al.*, 2020). El análisis cuantitativo y cualitativo de la producción científica internacional, considerando los registros bibliográficos indexados en diferentes bases de datos, permite inferir sus tendencias y proporcionar las bases para la toma de decisiones y reorientar la investigación (Bravo-Vinaja y Méndez-Gallegos, 2016).

No obstante, su creciente e interés científico y a pesar de la publicación de estas excelentes revisiones sobre temas específicos, donde solamente se sintetiza la literatura científica disponible, existen pocas investigaciones previas en las cuales se utilice la bibliometría para caracterizar sistemáticamente la producción científica y su impacto. Uno de los primeros estudios del que se tiene conocimiento fue realizado por Ingles y Liguri (2010), donde se abordaron temáticas sobre biología y ecofisiología. Posteriormente, se registraron estudios bibliométricos sobre temas específicos tales como: El efecto del nopal sobre el peso corporal y los factores de riesgo cardiovascular (Onakpoya *et al.*, 2015); una revisión de bibliografía científica y técnica sobre el uso de *Opuntia* spp. como forraje (Grünwaldt *et al.*, 2015); los escenarios de cambio climático y su potencial para la biorremediación de aguas residuales en regiones semiáridas (de Souza Ferraz *et al.*, 2017); el mapeo del conocimiento de *Opuntia Milpa Alta* desde 1998 (Chen *et al.*, 2021); los constituyentes químicos y compuestos bioactivos, con especial atención a los polifenoles (Durazzo *et al.*,

2021) y bioprospección y potencial de los mucilagos de nopal (de Andrade Vieira *et al.*, 2023). Finalmente, Ramadan *et al.* (2021) en el capítulo introductorio de su obra, abordaron de manera parcial la literatura internacional de *Opuntia* spp, con información obtenida de PubMed, WoS y Scopus. El único estudio donde se analiza esta especie de manera global fue realizado por Bravo-Vinaja y Méndez-Gallegos (2016), por lo que no se cuenta con estudios recientes que incluyan estudios bibliométricos actualizados que aborden todos los aspectos relacionado a nopal a nivel nacional e internacional.

Considerando que actualmente el abordaje que se tiene en el desarrollo científico sobre nopal tiene carácter interdisciplinario donde confluyen diversos campos de la ciencias, tales como de la salud, naturales, biológicas y que la disponibilidad de información y generación de conocimientos requiere de ser sistematizada y analizada rigurosamente a partir de indicadores bibliométricos, para conocer comportamiento, regularidades y dinámica de la investigación, así como las temáticas relevantes y emergentes, en este estudio se condujo un análisis bibliométrico usando los registros bibliográficos de la producción científica internacional disponible en el Science Citation Index Expanded (SCIE) y Social Sciences Citation Index (SSCI), pertenecientes al Web of Science (WoS), como instrumento de apoyo para la toma de decisiones en análisis posteriores y una guía a otros investigadores interesados en este tópico.

III. Materiales y métodos

3.1 Proceso de búsqueda, recuperación y selección de la información

Para caracterizar y analizar la producción científica relacionada a nopal se recuperaron los registros de los documentos indizados en las bases de datos Science Citation Index Expanded (SCIE) y Social Sciences Citation Index (SSCI) incluidas en la Colección principal del Web of Science Web of Science (WoS), producto desarrollado por Clarivate Analytics®. Dichas bases de datos son consideradas a nivel internacional de alta calidad por sus políticas de revisión por pares y el rigor editorial.

En la recuperación de la información se empleó la siguiente ecuación de búsqueda para recuperar la información, utilizándose los términos: *Opuntia*, (exceptuando los registros de *Halimeda opuntia*), nopal, “cactus pear” y “prickly pear” en los campos de título, resumen y palabras clave, usando la ecuación de búsqueda: TS=(*opuntia* OR nopal OR “cactus pear*” OR “prickly pear*”) NOT TS=(*Halimeda opuntia*), y cuyos resultados se observan en el Cuadro 1.

Considerando que el WoS exige a las revistas indexadas que los documentos deben incluir el título, resumen y palabras clave, independientemente del idioma de origen, se utilizó el idioma inglés para los términos utilizados en la búsqueda. La recopilación y extracción de las publicaciones científicas comprendió el periodo entre 1900 a 2022 (la fecha de corte fue el 19 de febrero de 2023). La búsqueda se limitó a la siguiente tipología de documentos: artículo científico, artículo de revisión, acceso temprano, nota científica, carta y noticia.

Cuadro 1. Resultados de la recuperación de los documentos sobre nopal indizados en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia.

Descriptor	Registros Bibliográficos
“Prickly pear*”	1140
“Cactus pear*”	688

Opuntia not “Halimeda opuntia”	4055
Nopal	358
Subtotal	6241
Total sin duplicados	4320

Los registros bibliográficos extraídos de las bases de datos consultadas se exportaron en formato RIS, al programa de manejo de referencias bibliográficas Zotero, para facilitar su manejo y procesamiento. Posteriormente estos registros se procesaron en Excel® y Bibliometrix® para generar los indicadores unidimensionales y bidimensionales: Regularidades y comportamiento de la literatura, Distribución de la tipología documental, Concentración y dispersión de las publicaciones en revistas de corriente principal, Publicaciones más citadas, Revistas con mayor número de citas por documento, Análisis de citas conjuntas entre revistas, Colaboración entre las revistas con más de 100 citas conjuntas, Índice de coautoría, Autores con mayor producción, liderazgo científico de autores, Redes de coautoría, Actualidad de los grupos de investigación, Artículos más citados por periodo, Instituciones más productivas e influyentes, Cooperación entre instituciones, Países con mayor producción científica, Cooperación entre países, Temáticas de investigación y Tendencias de investigación. Para elaborar y visualizar mapas de redes se empleó el software VOSviewer® V1.6.15, a partir de los registros previamente normalizados. Este programa permite crear y visualizar mapas a partir de registros bibliográficos obtenidos en bases de datos. La conexión de los elementos que conforman estas redes se puede obtener por coautoría, coocurrencia, citas, citas conjuntas, y acoplamiento bibliográfico (Van Eck y Waltman, 2010).

IV. Resultados y discusión

4.1 Regularidades y comportamiento de la literatura

Como resultado del análisis bibliométrico realizado se lograron extraer 4320 documentos publicados sobre la temática objeto de estudio en las bases de datos consideradas [Science Citation Index Expanded (SCIE) y del Social Science Citation Index (SSCI)], durante el periodo de 1900 a 2022; estos documentos se publicaron en 1197 diferentes revistas científicas y donde participaron alrededor de 13 100 autores (de los cuales alrededor de 10 000 son transitorios (Price y Gürsey, 1975), es decir, solo publicaron un artículo) pertenecientes a 113 países. Hasta 2021, Ramadan *et al.*, (2021) encontraron 4000 en esta misma base de datos, 4300 en Scopus y 1155 en PubMed, aunque en su búsqueda ellos ampliaron la tipología documental, tales como los resúmenes de congresos y capítulos de libro, entre otros.

El volumen de los documentos recuperados durante el siglo pasado (1900-2000) fue reducido, con únicamente 677 manuscritos, que corresponden a 15.68 % del total de los documentos publicados. Es a partir del año 2000 que comienza a mostrarse un gran dinamismo en la publicación de documentos indizados en las bases de datos consultadas, ya que durante estos 22 años se recuperaron 84.32 % del total (Figura 1). Particularmente en los últimos 12 años se registraron 2704 documentos, que corresponde al 62.59 % del total recuperado, aún y cuando hubo en 2013 se presentó una baja de 36 documentos indizados respecto a 2012. A partir de 2016 se observó un aumento sostenido en el número de publicaciones durante el periodo analizado y el pico más alto, en cuanto a producción científica, se registró durante el último año de observación (2022). La tendencia obtenida muestra que la productividad científica en las revistas de corriente principal, registró un

notable dinamismo y un crecimiento sostenido, a través del periodo de observación, denotando la relevancia e interés científico en la temática.

La producción científica recuperada mostró un crecimiento lineal ($R^2 = 0.88$). Este comportamiento podría estar asociado a un incremento en la inversión en investigación y desarrollo (I+D), durante los últimos años, en algunos de los países que aportan investigación sobre la temática, que se ha reflejado en la publicación científica. También podría estar relacionado al incremento de revistas en las plataformas de publicación en acceso abierto bajo el esquema de negocio “cargo por procesamiento de artículo” (Schimmer *et al.*, 2015), tal como MDPI, una editorial de revistas científicas de acceso abierto, así como por la incentivación de los gobiernos e instituciones de fomentar la publicación científica. De igual manera podría ser resultado del reciente interés de científicos y tecnólogos por esta línea de investigación a nivel global, dada la aplicabilidad de los compuestos bioactivos (Ramadan *et al.*, 2021), de las evidencias científicas de sus propiedades farmacológicas y terapéuticas (Madrigal-Santillán *et al.*, 2022), las actividades biológicas y nutricionales de sus componentes fitoquímicos (Abbas *et al.*, 2022), y por la inclusión de otras áreas científicas que se están abordando y desarrollando.

Respecto a nuestro país, el incremento en la productividad científica sobre el nopal, podría estar asociado a la política pública actual, de incentivar la pertinencia de las instituciones de educación y centros de investigación para cumplir con indicadores cuantitativos institucionales en la formación de recursos humanos especializados, la certificación y acreditación y la retribución social.

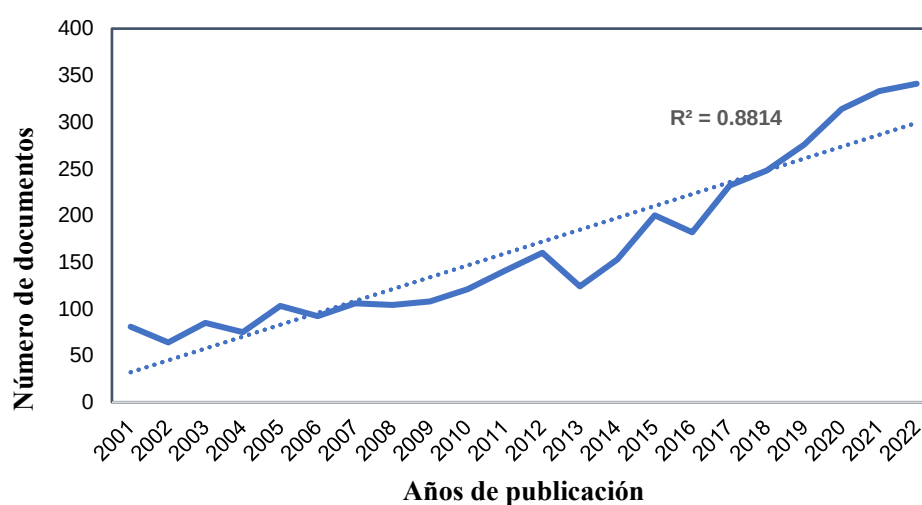


Figura 1. Evolución de la literatura indizada, relacionada a nopal, en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index de la Colección Principal del Web de la Ciencia (2001-2022).

4.2 Distribución de la tipología documental

El análisis detallado del comportamiento de la tipología documental de las publicaciones sobre nopal, permitió visualizar los medios que los autores utilizan para la divulgación científica a sus pares académicos. Los registros bibliográficos extraídos mostraron una alta diversidad en la tipología de documentos. El porcentaje más alto de éstos que fueron

recuperados corresponden a artículos originales; también, existe una importante cantidad de artículos de revisión, un comportamiento característico propio de la investigación a nivel global. En menor proporción se observaron otras tipologías como: acceso temprano, nota científica y cartas (Cuadro 2). De manera general, al igual que sucede en otras disciplinas científicas los artículos originales en revistas de corriente principal y los artículos de revisión resultaron los tipos de documentos más comunes; ya que ambos acumularon más de 95 % del total de documentos extraídos, por lo que pueden ser considerados los principales medios de divulgación científica, por parte de los investigadores.

Un aspecto importante para destacar es la tendencia a una reducción de los documentos relacionados a eventos de actualización (reuniones, congresos o simposios, etc.), donde se fomenta el intercambio de información y la discusión y se actualizan conocimientos y metodologías, derivado posiblemente de la prevalencia del COVID 19 a nivel mundial.

Cuadro 2. Tipos de documentos de los registros bibliográficos indizados en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Tipos de documentos	Registros recuperados	bibliográficos
Artículo científico	4062	
Artículo de revisión	195	
Acceso temprano	43*	
Nota científica	40	
Carta	16	
Noticia	7	
Subtotal	4363	
Total	4320	

*Los 43 registros identificados como “Acceso temprano” también se clasifican en alguno de los otros tipos de documentos.

4.3 Concentración y dispersión de las publicaciones en revistas de corriente principal

Respecto a la publicación en las revistas que abordan la temática durante el periodo de estudio, se logró identificar las revistas con la mayor actividad en la publicación, donde los documentos relacionados al nopal son divulgados. Los 4320 documentos extraídos sobre nopal, fueron publicados en 1197 revistas; aunque se observó una alta concentración de los artículos en unas pocas revistas, ya que tan solo 30 revistas (2.51 %) conjuntaron 24.89 % (1028 documentos) de las publicaciones; en tanto que las restantes tres cuartas partes de los manuscritos fueron publicados en 1167 revistas (97.49 %) (Cuadro 3). Un indicador de la alta dispersión de los documentos indizados es que 617 (51.55 %) revistas publicaron un solo documento.

Entre las revistas más relevantes, en función del número de artículos publicados, se destacó el Journal of the Professional Association for Cactus Development, ya que registró el mayor índice con 185 publicaciones que corresponden a 4,28 %. Este valor estuvo muy por encima del resto de las revistas que abordan la temática. La segunda fuente con el mayor número de documentos publicados correspondió al Journal of Arid Environments (77 documentos); a continuación, le siguió Food Chemistry (52 documentos). A nivel Latinoamérica las revistas más sobresalientes resultaron el Brazilian Journal of Animal Science, de Brasil y la revista Agrociencia, editada por el Colegio de Postgraduados en México, con 35 y 25 documentos, respectivamente. Lo anterior demuestra, que con

excepción del Journal of the Professional Association for Cactus Development, existen pocas revistas especializadas sobre este tópico y que existe una alta variedad de publicaciones, principalmente, sobre alimentos, nutrición y ciencias de salud que están incorporando en sus contenidos, resultados del proceso de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) sobre la temática, lo que demuestra la alta variación en el campo disciplinar que se está involucrando en el desarrollo científico sobre nopal.

También es necesario resaltar que, aunque no se incluyeron aquí, se logró identificar que un alto porcentaje de documentos relacionados a nopal, se publicaron en la revista *Acta horticulturae*, la cual incluye los resultados de investigación que se presentan en los Congresos Internacionales de Nopal y Cochinilla, dichos documentos no cuentan con una revisión por pares académicos, ni llevan una revisión editorial rigurosa. Debido a ello, Ramadan *et al.*, (2021) identificaron esta revista con el mayor número de contribuciones.

4.4 Revistas más citadas

Entre las 25 fuentes que recibieron más de 600 citas, dentro del período de tiempo en estudio y con fecha de corte al 19 de febrero del presente, destacó *Carbohydrate Polymers* (3681). Posteriormente, le siguió *Food Chemistry* con 3633 y el *Journal of Agricultural and Food Chemistry* con 3370; esta última sobresalió porque a pesar de contar con número más bajo de documentos publicados, recibió un alto número de citaciones. Tomando en cuenta esta tendencia, se les puede considerar las revistas más influyentes y con alta visibilidad e impacto, considerando las citas recibidas. Sólo *Carbohydrate Polymers* y *Diabetes Care* reciben más de 100 citas por artículo sobre el tema y el resto de las revistas reciben menos de 100 citas por artículo sobre el tema.

Ahora bien, 18 de las 25 revistas listadas, están colocadas en el primer cuartil de su categoría de la ciencia, de acuerdo al Journal Citation Reports (JCR), lo cual indica que son revistas que cuentan con los niveles más altos en su categoría de acuerdo con su FI 2021. Hay cinco revistas con FI arriba de 10: *Carbohydrate polymers*, *New Phytologist*, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *Food Hydrocolloids* y *Diabetes Care* (Cuadro 4). Dos revistas se encuentran en el cuartil 2, y cuatro en el cuartil 3, entre ellas el *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, que tiene la relación de citas por documento más baja, a pesar de ser la que mayor número de documentos publica. El índice H (Hirsch, 2005) para las revistas sobre nopal es 122, es decir, existen al menos 122 publicaciones con al menos 122 citas. Un indicador de la no influencia de la literatura, es que 14% de las publicaciones no han recibido alguna cita, lo cual concuerda con lo mencionado por (Spinak, 1996) donde menciona que 15 % de los documentos publicados nunca han sido citados; sin embargo, este porcentaje está influenciado por diversos factores; por ejemplo, el tamaño de los documentos (Hu y Wu, 2014). En cuanto a las categorías JCR, de las 25 listadas, cinco pertenecen a ciencia y tecnología de los alimentos y cinco sobre ciencias de las plantas; la revista con el porcentaje más alto de citas por documento está categorizada en endocrinología y metabolismo (Cuadro 4).

4.5 Revistas con mayor número de citas por documento

La mayoría de las revistas con la relación de citas más alta por documento, han publicado un solo artículo; esto es significativo, ya que indica que los artículos publicados en estas

revistas tienen una gran cantidad de citas (Cuadro 5). Este cuadro también muestra los temas que tienen mayor impacto al identificar la temática de publicación de las revistas. Es importante destacar el notable comportamiento que presentó la revista Diabetes Care, la cual con sólo tres documentos publicados fue referenciada en 605 citas y cada uno de esos manuscritos registró el promedio más alto de citaciones por documento (201), lo que demuestra el dinamismo e interés creciente de la planta en las áreas de ciencias de salud. De igual manera resulta interesante resaltar que dentro de las principales revistas que obtuvieron un alto número de citaciones, se clasificaron en las áreas de nutrición y salud.

Cuadro 3. Revistas que publicaron alrededor del 25% de documentos sobre nopal, indizados en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Título de la publicación	Documentos Indizados	% de 4320 documentos
<i>Journal of The Professional Association For Cactus Development</i>	185	4.282
<i>Journal of Arid Environments</i>	77	1.782
<i>Food Chemistry</i>	56	1.296
<i>Molecules</i>	41	0.949
<i>Florida Entomologist</i>	39	0.903
<i>Haseltonia</i>	39	0.903
<i>LWT Food Science and Technology</i>	38	0.880
<i>Carbohydrate Polymers</i>	36	0.833
<i>Food Research International</i>	35	0.810
<i>Brazilian Journal of Animal Science</i>	35	0.810
<i>Journal of Agricultural and Food Chemistry</i>	34	0.787
<i>American Journal of Botany</i>	33	0.764
<i>Foods</i>	30	0.694
<i>International Journal of Biological Macromolecules</i>	30	0.694
<i>Oecologia</i>	30	0.694
<i>Agrociencia</i>	29	0.671
<i>Journal of Food Processing and Preservation</i>	28	0.648
<i>Journal of the Science of Food and Agriculture</i>	28	0.648
<i>Industrial Crops and Products</i>	26	0.602
<i>Journal of Ethnopharmacology</i>	26	0.602
<i>Plant Foods for Human Nutrition</i>	26	0.602
<i>Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental</i>	26	0.602
<i>Revista Caatinga</i>	26	0.602
<i>Plant Physiology</i>	25	0.579
<i>Plos One</i>	25	0.579
<i>Scientia Horticulturae</i>	25	0.579
<i>Desalination and Water Treatment</i>	24	0.556
<i>Journal of Food Science and Technology Mysore</i>	23	0.532
Total	1028	24.89
Resto de revistas	3245	75.11

4.6 Análisis de citas conjuntas entre revistas

El análisis de citas conjuntas permite identificar los documentos, revistas y autores que muestran el liderazgo científico en la generación de nuevo conocimiento, que una cita de manera individual, ya que indica que la aparición conjunta de menciones en un documento significa que están relacionadas entre sí y en consecuencia están relacionadas con el documento en que se está referenciando.

En este apartado se reconocen no solo aquellas revistas que no abordan en sus tópicos principales sobre el nopal, sino también sobre temas que tienen una marcada influencia en los documentos sobre el tema. Considerando lo anterior se registró que nueve de las revistas con más citas conjuntas abordan sobre ciencia y tecnología de los alimentos, entre las cuales destacan Food Chemistry y el Journal of Agricultural Food Chemistry ya que ocupan los primeros lugares en esta lista de 20 revistas (Cuadro 6).

Ello demuestra que los temas primordiales en la investigación sobre nopal están fuertemente relacionados con la ciencia y tecnología de los alimentos. En la lista aparece Acta Horticulturae, la cual no se indiza en SCIE, pero que según los artículos sin indizar tiene cierta influencia en los mismos.

4.7 Colaboración entre las revistas con más de 100 citas conjuntas

El mapeo de las relaciones entre las revistas con citas conjuntas permite identificar las temáticas de investigación sobre nopal que predominan, considerando como fuente las temáticas que es posible identificar con los títulos de las revistas (Figura 2). De esta forma, se logró determinar cinco grandes temas: Ciencia y tecnología de los alimentos (conjunto rojo), representada por las revistas Journal of Agricultural Food Chemistry and Food Chemistry; Botánica y ecología de poblaciones (conjunto verde), constituida principalmente por Journal of Arid Environments, American Journal of Botany and Ecology; Horticultura y fisiología (conjunto verde claro), representada por las revistas Plant Physiology y el Journal of the Professional Association for Cactus Development; Polímeros y biorecursos (conjunto azul), donde destacan, particularmente, las revistas Carbohydrate polymers y Bioresource technologies; y Forrajes (morado), representada por la Revista Brasileña de Zootecnia.

4.8 Índice de coautoría

Este índice es generado de la división del número total de autores que intervienen en un manuscrito por el número total de artículos publicados, para un periodo en estudio. Conocer el desarrollo de la colaboración científica para publicar documentos es un indicador de la fortaleza del proceso de investigación llevado a cabo y de la existencia de grupos de investigación que conjuntan recursos humanos, logísticos y financieros e infraestructura, para fomentar el avance de la ciencia y la resolución de problemas. Con el incremento mostrado en la colaboración científica sobre nopal (Figura 3), se evidencia que la publicación conjunta entre investigadores sobre nopal mantiene una tendencia al alza, como sucede con otras áreas de las ciencias experimentales, lo que pone de manifiesto que se ha incentivado la política de integrar grupos para abordar de una manera

interdisciplinaria o desde distintos enfoques, la resolución de la problemática (García-Fernández *et al.*, 2016; Rodríguez y Sancho, 2020; Urrea-Solano *et al.*, 2022).

Cuadro 4. Revistas científicas con documentos indizados sobre nopal con 600 citas o más en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Publicación (FI/JCI 2021)	Categoría JCR, Posición, Cuartil (FI)	Doctos.	Citas	Citas por doctos.
<i>Carbohydrate Polymers</i> (10.73/2.19)	Química orgánica (2/56, C1)	36	3681	102.25
<i>Food Chemistry</i> (9.23/1.89)	Ciencia y tecnología de los alimentos (8/144, C1)	56	3633	64.86
<i>Journal of Agricultural and Food Chemistry</i> (5.89/1.43)	Agricultura multidisciplinaria (6/59, C1)	34	3370	97.77
<i>Journal of Arid Environments</i> (2.76/0.57)	Ecología (92/173, C3)	77	2366	35.34
<i>Journal of Ethnopharmacology</i> (5.19/1.44)	Medicina integradora y complementaria (4/30, C1)	26	2233	99.12
<i>Oecologia</i> (3.3/0.78)	Ecología (71/173, C2)	30	2189	72.97
<i>Journal of the Professional Association for Cactus Development</i> (1.33/0.25)	Horticultura (21/36, C3)	186	1673	8.99
<i>American Journal of Botany</i> (3.33/0.98)	Ciencias de las plantas (72/239, C2)	33	1393	42.21
<i>Food Research International</i> (7.43/1.57)	Ciencia y tecnología de los alimentos (13/144, C1)	35	1390	39.71
<i>Plant Physiology</i> (8.01/2.37)	Ciencias de las plantas (11/239, C1)	25	1329	53.16
<i>Plant Foods for Human Nutrition</i> (4.14/0.82)	Ciencias de las plantas (50/239, C1)	26	1208	52.52
<i>Lwt-Food Science and Technology</i> (6.06/1.36)	Ciencia y tecnología de los alimentos (29/144, C1)	38	1116	29.37
<i>J. of Experimental Botany</i> (7.38/1.64)	C. de las plantas (14/239, C1)	20	1093	54.65
<i>Industrial Crops and Products</i> (6.45/1.60)	Agronomía (8/124, C1)	26	1016	39.07
<i>New Phytologist</i> (10.32/2.28)	C. de las plantas (8/239, C1)	11	987	89.73
<i>Journal of Food Engineering</i> (6.20/1.26)	Ciencia y tecnología de los alimentos (29/143, C1)	14	789	56.36
Critical Reviews in Food Science and Nutrition (11.21, C1/1.22)	Nutrición y Dietética (13/109, C1)	10	728	68.60
<i>Ecology</i> (6.43/1.36)	Ecología (22/173, C1)	13	723	55.62
<i>Florida Entomologist</i> (1.43/0.46)	Entomología (58/100, C3)	39	713	18.28
<i>International Journal of Biological Macromolecules</i> (8.03/1.42)	Ciencia de polímeros (6/90, C1)	30	692	23.07
<i>Molecules</i> (4.93/0.64)	Bioquímica y Biología Molecular (114/297, C3)	41	692	16.88
<i>Journal of the Science of Food and Agriculture</i> (4.13/0.95)	Agricultura multidisciplinaria (12/59, C1)	28	672	24.00
<i>Food Hydrocolloids</i> (11.5/2.25)	Ciencia y Tecnología de los Alimentos (5/144, C1)	14	654	46.71
<i>Diabetes Care</i> (17.16/3.55)	Endocrinología y Metabolismo (5/180, C1)	3	610	203.34

FI = Factor de Impacto, JCI = Journal Citation Indicator, Doc. = Documento, Docs. = Documentos.

Cuadro 5. Diez publicaciones sobre nopal con más citas por documento en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Publicación (FI, JCI 2021)	Categoría JCR, Posición, Cuartil (FI)	Documentos	Citas	Citas por documento
<i>Annual Review of Entomology</i> (2.73, 3.86)	Entomología (1/100, C1)	1	416	416
<i>Corrosion Science</i> (7.72, 1.63)	Metalurgia ingeniería metalúrgica (4/79, C1)	1	381	381
<i>Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology</i> (17.37, NA) ^a	Ciencias de las plantas (1/134, C1)	1	295	295
<i>Frontiers in Bioscience-Landmark</i> (3.12, 0.60)	Bioquímica y biología molecular (207/294, C3)	1	245	245
<i>Brain Research</i> (3.61, 0.74)	Neurociencias (156/275, C3)	1	233	233
<i>Diabetes Care</i> (17.16, 3.55)	Endocrinología y metabolismo (6/146, C1)	3	605	201
<i>Current Opinion in Food Science</i> (9.80, 1.29)	Ciencia y tecnología de los alimentos (7/144, C1)	1	181	181
<i>Journal of the American Academy of Dermatology</i> (15.49, 3.49)	Dermatología (1/69, C1)	1	181	181
<i>Journal of Molecular Liquids</i> (6.64, 1.25)	Física, atómica, molecular y química (6/36, C1)	1	179	179
<i>Molecular Nutrition & Food Research</i> (6.58, 1.24)	Ciencia y tecnología de los alimentos (21/144, C1)	3	532	177

a) FI del año 2001. Activa de 1988 a 2001. Actualmente, tiene por título *Annual Review of Plant Biology* (FI 28.10).

Durante los cinco periodos en que se dividió la evolución del índice de coautoría, éste se incrementó de manera consistente a través del tiempo de observación y osciló de dos autores a finales del siglo pasado a 5.3 autores firmantes para el 2022. El índice de coautoría promedio fue de 3.73 autores por documento, lo que denota que se privilegia la integración de grupos de colaboración entre autores en cada documento original publicado. Con esta tendencia en la colaboración científica, se confirma que la publicación conjunta entre investigadores sobre nopal es una tendencia actual y potencialmente importante. Los documentos publicados firmados por un solo autor sobre nopal fueron muy escasos (283), que corresponden al 6.5 %, la mayoría de ellos registrados en las primeras décadas del siglo XX. Además, un alto porcentaje de las publicaciones se realizó con colaboración de otras instituciones; es decir, más del 75 % de los documentos se publicaron en coautoría nacional, pero se tiene una baja cooperación internacional (23.65 %).

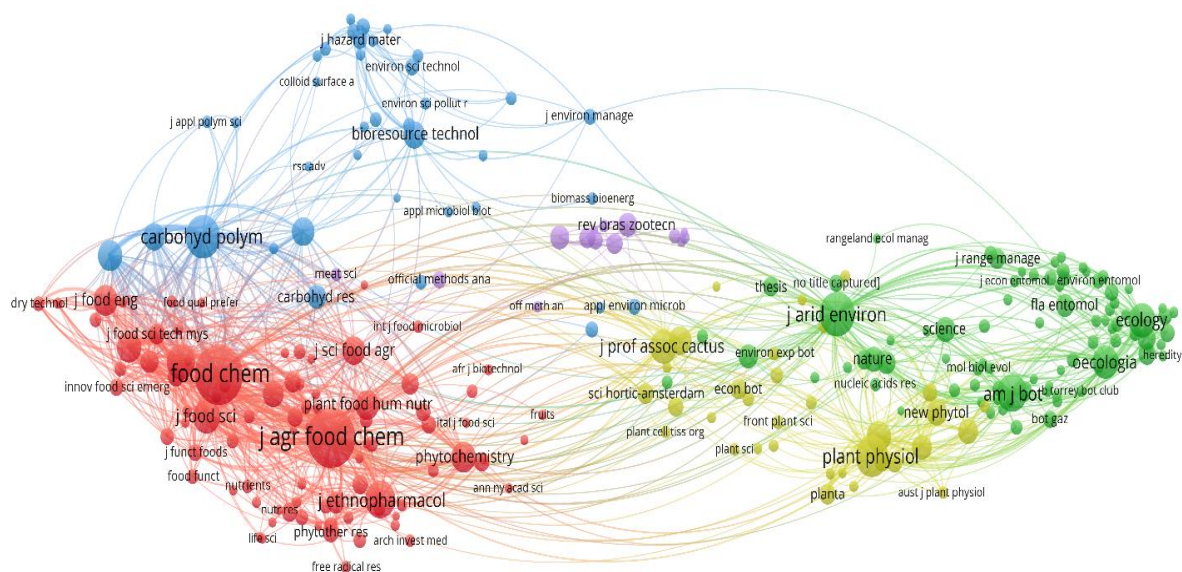


Figura 2. Mapa de las citas conjuntas entre las revistas citadas sobre nopal en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Cuadro 6. Revistas con más citas conjuntas sobre nopal, en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Revistas	Citas conjuntas
<i>Food Chemistry</i>	3364
<i>Journal of Agricultural Food Chemistry</i>	3347
<i>Journal of Arid Environments</i>	1869
<i>Carbohydrated Polymers</i>	1796
<i>Plant Physiology</i>	1540
<i>American Journal of Botany</i>	1268
<i>Food Research International</i>	1215
<i>Journal for Ethnopharmacology</i>	1133
<i>Journal of Food Science</i>	1128
<i>Journal of the Professional Association for Cactus Development</i>	1127
<i>Journal of Food Engineering</i>	924
<i>Lwt-Food Science and Technology</i>	908
<i>Oecologia</i>	900
<i>Food Hydrocolloids</i>	898
<i>Journal of Experimental Botany</i>	881
<i>Phytochemistry</i>	881
<i>Plant Food Human Nutrition</i>	859
<i>Ecología</i>	843
<i>Acta Horticulturae</i>	791

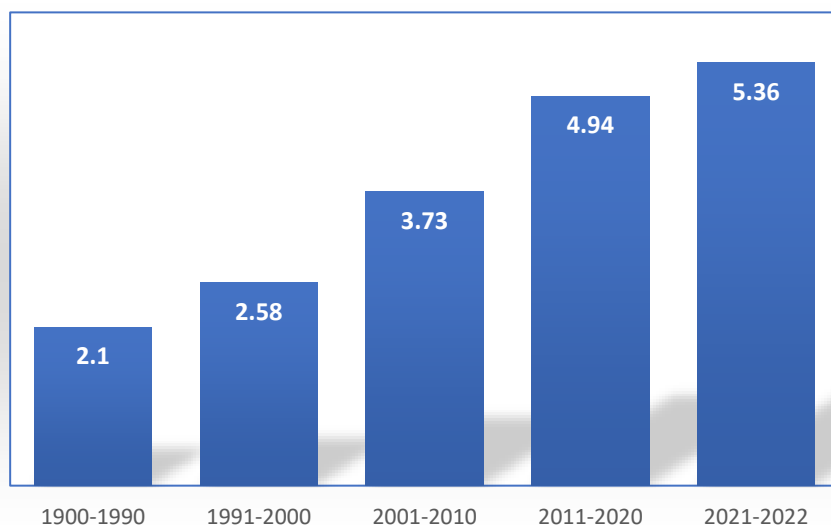


Figura 3. Evolución del índice de coautoría por periodo, de los documentos publicados sobre nopal, indizados en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Finalmente, es importante destacar que, en la producción científica de esta temática, no se registraron estudios multicéntricos, elaborados por consorcios de investigación como en otros campos científicos, tal y como sucede en otras áreas de la ciencia donde se tienen colaboraciones y participaciones numerosas, por ejemplo: física de partículas (868), astronomía y astrofísica (40) y ciencias de la salud (15 a 26) (Sanz Casado et al., 2016).

4.9 Autores con mayor producción

El autor con mayor producción (105 documentos) sobre aspectos relacionados a la ecofisiología del nopal fue Park S. Nobel, exprofesor de la Universidad de California en Los Ángeles, EE. UU., el cual prácticamente duplica en productividad al investigador más cercano. Por Brasil, destacaron: Marcelo Ferreira, T. J. Freire y Djalma Cordeiro; de Italia, Paolo Inglese, Luisa Tesorerie, M. A. Livrea y Mario Allegra; de México, Clemente Gallegos-Vázquez, Juan A. Reyes- Agüero, B. Murillo-Amador, Cecilia B. Peña-Valdivia y Juan R. Aguirre Rivera; de Alemania, C. Reinhold, y de Marruecos M. Mahrouz, con 20 o más documentos publicados sobre el tema (Cuadro 7). Los autores mexicanos y brasileños, al ser dos de las economías más desarrolladas en la región, son los que predominan, en cuanto al número de publicaciones que aportan, aunque ya se empieza a notar la aparición de otros países como Italia y Marruecos. También es destacable que los documentos aportados por los países americanos suponen en promedio el 70 % de la producción científica mundial.

Considerando el total de autores que intervinieron en la temática (13,100 aproximadamente), y la productividad registrada en el Cuadro 7, la publicación se concentra en un reducido grupo de autores. Lo que demuestra que un alto porcentaje (76.33 %) se encuentran entre los considerados aspirantes (tesistas) y transitorios u ocasionales;

estos datos del índice de transitoriedad, es similar al encontrado en otras áreas de la ciencia como optometría (80.53 %) (Ruiz-Pomeda *et al.*, 2020).

4.10 Liderazgo científico de autores

Este indicador permite identificar aquellos autores con el liderazgo científico, en este campo de la ciencia, de acuerdo con las bases de datos empleadas. La influencia de un autor en una nueva investigación se mide por medio del número de citas en documentos publicados sucesivamente; una forma de expresarla es contabilizando simplemente el número de citas que ha recibido la publicación de un autor, o bien por medio del Índice H (Hirsch, 2005). Este índice mide la relación entre el número de documentos publicados por un autor y el número de veces que ha sido citado (Cuadro 8). En este se listan los autores con más citas, pero que han publicado más de nueve documentos sobre nopal, ya que existen autores con más citas, pero publicaron solamente uno o dos documentos, por lo que su autoría sobre el tema es incidental o transitorio (Ver Cuadro 9).

El liderazgo científico sobre la temática recayó en el Dr. P. S. Nobel, investigador retirado de la Universidad de California University, cuyas áreas de especialización fueron Bioquímica y Biología Molecular y Biofísica, ya que resultó el autor con mayor número de citas con 3835 citas recibidas en sus 105 artículos publicados sobre el tema. El Dr. Nobel tiene un índice H general de 60 (Cuadro 8), pero para los documentos sobre nopal, el índice H observado es de 36, lo cual significa que, de sus 105 documentos, 36 tienen al menos 36 citas; su artículo con más citas es Nobel, (1991) con 153. En el segundo caso aparece, David M. Richardson de la Universidad Stellenbosch, en Sudáfrica, el cual se especializa en Ciencias Ambientales y Ecología; el Dr. Richardson tiene un índice H de 103, lo que significa que ha participado como coautor en 103 documentos y cuenta con al menos 103 citas en todos sus trabajos que han sido indizados en el SCIE y SSCI; sin embargo, sobre nopal sólo se identificaron nueve documentos. De estos artículos (Thuiller *et al.*, 2006) con 232, es el que mayormente ha sido citado. En el listado, de nuestro país, solo aparece J. A. Reyes Agüero con 659 citas recibidas, siendo el autor con mayor influencia en México. También destacó Medina-Torres L., de la Facultad de Química, UNAM, quién obtuvo un Índice H más alto (22), pero recientemente ha abordado en sus publicaciones otras especies; sus citaciones ascendieron a 659.

4.11 Redes de coautoría

La identificación de las redes de coautoría también conocidas como “colegios invisibles”. permiten identificar los patrones de colaboración científica de quienes participan en las publicaciones sobre nopal. El programa informático VosViewer, permitió identificar a los distintos conglomerados de investigadores que realizan investigación y generan conocimiento sobre el tema.

En la Figura 4 se muestran 38 clusters conformados por 119 autores que tuvieron 10 o más documentos indizados en el SCIE y SSCI del WoS. La centralidad de la red de colaboración está ocupada por tres nodos principales: El nodo principal lo ocupa Park S. Nobel y Eulogio Pimienta, aunque es el que menos vínculos tiene. Las otras dos redes de coautoría más visibles están conformadas por un mayor número de elementos: el clúster rojo, que presenta el mayor número de integrantes está conformado por 11 investigadores ordenados alfabéticamente por apellido: Fidel Blanco-Macías, Arnoldo Flores-Hernández, Clemente Gallegos-Vázquez, José L. García-Hernández, Santiago de J. Méndez Gallegos, C. Mondragón-Jacobo, Bernardo Murillo-Amador, Ignacio Orona-Castillo, Enrique Troyo-

Diéguez, Ricardo D. Valdez-Cepeda, y Rigoberto E. Vázquez-Alvarado. La red de coautoría en azul marino está conformada por ocho integrantes: Juan R. Aguirre-Rivera, Ana Paulina Barba de la Rosa, Joel Corrales-García, J. Flores, Juan Francisco Jiménez-Bremont, Cecilia B. Peña-Valdivia, Juan A. Reyes-Agüero y María T. Terrazas-Salgado, ambos grupos de México. Con igual número de integrantes, en verde se destacan el grupo compuesto por Francia y países del norte de África: I. Achour, I. Barros, N. del C. Cruz-Cansino, I. Delgado-Olivares, ICFR Ferreira, D. Le Cerf, y H. Madjoub. Estos grupos de colaboración podrían ser considerados quienes ostentan el liderazgo científico sobre este tópico. La visualización también muestra grupos de coautoría con menos integrantes; por ejemplo en color verde claro se destaca el grupo brasileño integrado por: Marcelo Ferreira de Andrade con otros seis investigadores entre los que se encuentra Djamina Dos Santos; junto a ellos en azul claro se distingue otro grupo de investigadores también brasileños, entre los que se encuentra: Thiers G. Freire da Silva y G. G. Leal de Araujo; en color violeta se visualiza el grupo italiano de Paolo Inglese y G. Ligouri; al lado en naranja, se encuentra el grupo conformado, principalmente, por Peter Felker, Reinhold Carle y Florian C. Stintzing; también, es posible distinguir los grupos de Luisa Tesoreire y Maria Allegra en morado tenue; en tonalidad lila, se encuentra el equipo integrado por James E. Carpenter y Stephen D. Hight; en azul tenue se encuentra el grupo de Mostafa Mahrouz y Y. Habibi; en rosa pálido se destaca el conjunto de Hofmann, Zimmerman, Moran y Foxcroft, de Sudáfrica; en naranja tenue se distingue el grupo de M. del Carmen Mandujano y Jordan Goluvov de la Universidad Nacional Autónoma de México; y en morado fuerte se encuentra el grupo donde destacan Jorge Welte Chanes y Janet A. Gutiérrez-Urbe.

Cuadro 7. Autores con 20 o más documentos sobre nopal, indizados en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Autor	Institución	Documentos	Citas
Nobel, Park S.	Universidad de California (EE.UU.).	105	3885
F., Marcelo de A.	Universidad Federal de Pernambuco (Bra.).	45	420
Inglese, Paolo	Universidad de Palermo (Italia).	37	773
Felker, P.	D'Arrigo Bros. California (EE. UU.).	34	1396
Tesorerie, Luisa	Universidad de Palermo (Italia).	31	1881
Gallegos-Vázquez, C.	Universidad A. de Chapingo (México).	29	278
Freire da Silva, T. G.	Universidad Federal Pernambuco (Bra.).	27	285
Carpenter James E.	USDA (EE.UU.).	26	404
Dos Santos, D. C.	Instituto Agronómico de Campinas (Bra.).	26	363
Livrea, M. Antonia	Universidad de Palermo (Italia).	26	1851
Allegra, Mario	Universidad de Palermo (Italia).	25	1698
Carle, Reinhold	Universidad de Hohenheim (Alemania).	24	2175
Donato Sergio Luiz R	Instituto Federal Baiano (Brasil).	24	146
Mahrouz, Mostafa	Universidad Cadi Ayyad (Marruecos).	24	1385
Reyes Agüero, J. A.	Universidad Autónoma de S. L. P., (Méx.).	23	659
Stintzing, Florian C.	Universidad de Hohenheim (Alemania).	23	2373
Hight, Stephen D.	USDA-ARS (EE.UU.).	22	298

Murillo-Amador, B.	CIBNOR, Baja California Sur (Méx.).	22	144
Peña-Valdivia, C. B.	Colegio de Postgraduados, (Méx.).	22	238
Aguirre Rivera, J. A.	Univ. Autónoma de S. L. P., (Méx.).	21	358

Cuadro 8. Autores y su Índice H, con más citas a sus documentos indizados en las bases de datos Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Autor (Índice H)	Docu- mentos	Citas
Nobel, Park S. (60)	105	3835
Stintzing, Florian C. (44)	23	2373
Carle, Reinhold (78)	24	2175
Tesoriere, Luisa (26)	31	1881
Livrea, Maria Antonia (26)	26	1851
Allegra, Mario (27)	25	1698
Felker, P. (19)	34	1396
Mahrouz, Mostafa (25)	24	1385
Sáenz-Hernández, Carmen (15)	20	1246
Fernández-López, JA (23)	14	991
Butera David (9)	7	985
Obon, José María (18)	11	859
Habibi, Youssef (46)	13	842
Castellar, María R. (15)	9	814
Inglese, Paolo (11)	37	773
Galati, Enza Maria (10)	10	691
Vignon Michel R. (43)	11	677
Mosshammer, Marcus R. (6)	7	665
Richardson, David M. (103)	9	644
Reyes Agüero, Juan A. (13)	23	659
Medina Torres, Luis (22)	15	626
Ennouri, Monia (14)	16	616
Montana, Carlos (26)	15	605
Zimmerman H. G. (21)	18	601

El índice H corresponde a todas las publicaciones de cada autor indizadas en el SCIE y SSCI, no solo a las relativas a nopal. Citas hasta el 19 de febrero de 2023.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado es posible considerar que las relaciones entre los coautores, se da sólo a nivel intra e interinstitucional a nivel nacional, pero con baja vinculación internacional. Incluso a nivel país se denota poca relación entre nodos, ya que existen grupos que trabajan de manera aislada y mantiene pocos vínculos, ocupando una posición periférica en el mapa, por lo que se requiere fomentar la colaboración entre grupos de trabajo y los centros de educación e investigación.

4.12 Actualidad de los grupos de investigación

La investigación sobre nopal ha crecido de manera sostenida a lo largo del siglo XX y las dos primeras décadas del siglo XXI. Sin embargo, durante los últimos 10 años se ha registrado la producción científica más alta; por ello, es posible diferenciar grupos de

investigación consolidados y emergentes. En la Figura 5, es posible visualizar diferentes agrupamientos. Los grupos en tonalidades más oscuras representan aquellos con mayor grado de consolidación y los más claros son considerados grupos emergentes. El primer grupo es liderado por P. Nobel, seguido por los grupos de Zimmerman, Moran y Hoffman; Stintzing y Felker; Inglese y Ligouri; y Mahrouz y Sáenz-Hernández, entre otros. Entre aquellos considerados como emergentes destacan los conformados por Marcelo Ferreira y el de Freire, de Brasil, entre otros. Otros equipos de trabajo que destacan y que son de reciente aparición están integrados por: Ramírez-Moreno y Ferreira; Gutiérrez-Uribe y Serna-Saldívar; De Wit y Hugo; y Donato Sergio y da Silva J. Es importante resaltar que existen tres grupos que se han mantenido vigentes durante los últimos años y que corresponden a los nodos encabezados por Reyes-Agüero y Mondragón-Jacobo, ambos de México y el de Tesoriere y Allegra, de Italia.

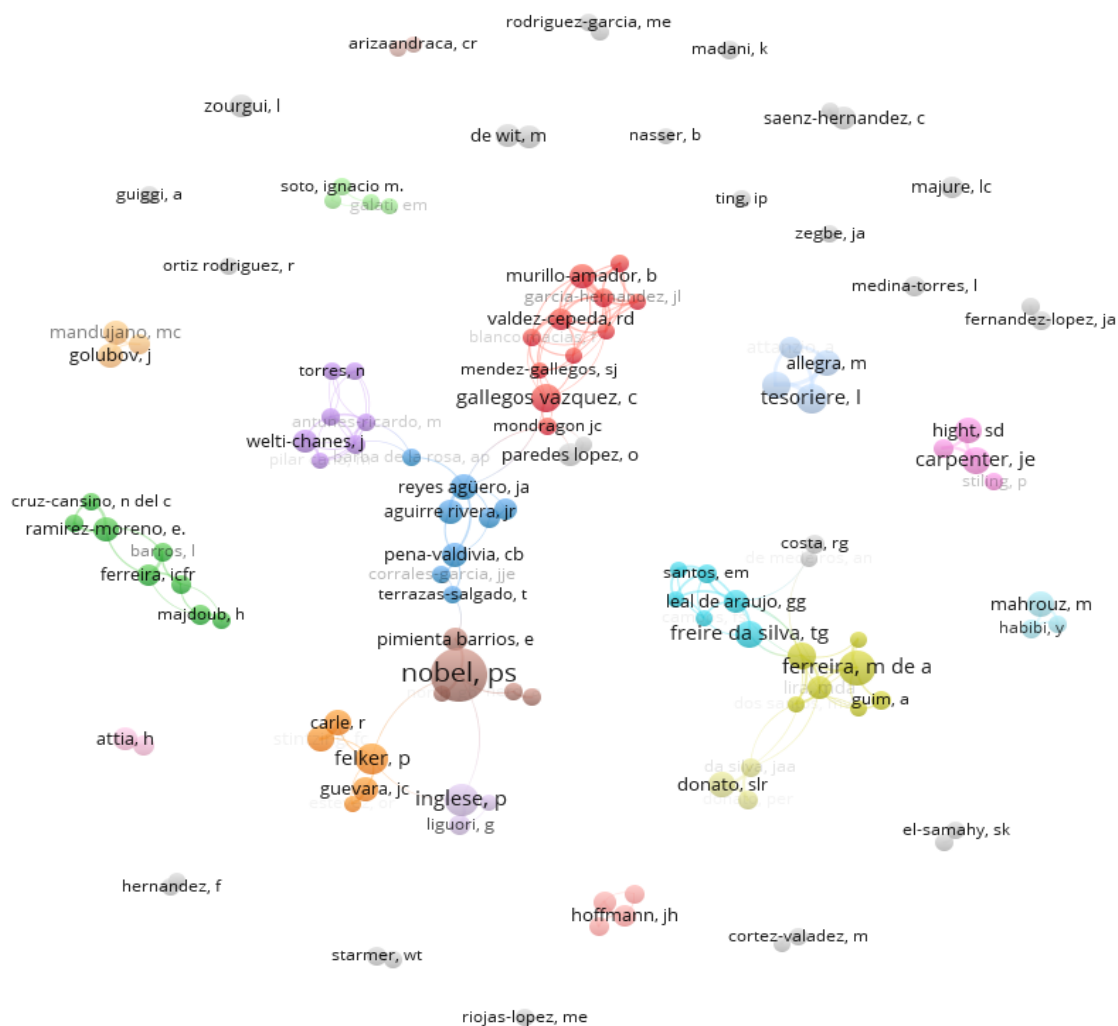
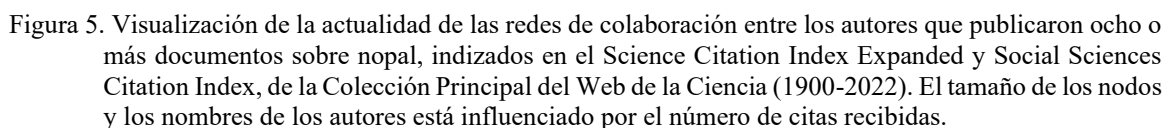


Figura 4. Grupos de colaboración entre los autores que publicaron diez o más documentos sobre nopal, en las revistas indizadas en Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022). El tamaño de los nodos y los nombres de los autores está influenciado por el número de documentos publicados.



De los 17 documentos más citados, ocho son artículos y nueve son revisiones; los tres del periodo 1900 a 1990 son artículos, y los de los últimos dos años estudiados, son revisiones; el documento con más citas globales es artículo. Otro aspecto relevante es qué en la mayoría de los artículos listados, su tema principal de investigación o revisión no es el nopal, sino que abordan el tema principal en conjunto con otras especies de plantas (Las referencias incluidas en el Cuadro 9 no se han integrado al listado general de referencias, ya que en este cuadro aparece la referencia completa para su consulta).

Cuadro 9. Artículos más citados sobre nopal indizados en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022). Separados por periodos de tiempo de publicación 1900-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020, y 2021-2022.

Periodo	Referencia	Citas / tipo
1900 a 1990	Russell, C., & Felker, P. (1987). The Prickly-Pears (<i>Opuntia</i> spp Cactaceae)—A Source of Human and Animal Food in Semiarid Regions. <i>Economic Botany</i> , 41(3), 433-445. https://doi.org/10.1007/BF02859062	16 5/a
	Szarek, S., Johnson, H., & Ting, I. (1973). Drought Adaptation in <i>Opuntia basilaris</i> —Significance of Recycling Carbon Through Crassulacean Acid Metabolism. <i>Plant Physiology</i> , 52(6), 539-541. https://doi.org/10.1104/pp.52.6.539	13 4/a
	Nobel, P., & Hartsock, T. (1983). Relationships Between Photosynthetically Active Radiation, Nocturnal Acid Accumulation, and Co ₂ Uptake for a Crassulacean Acid Metabolism Plant, <i>Opuntia ficus-indica</i> . <i>Plant Physiology</i> , 71(1), 71-75. https://doi.org/10.1104/pp.71.1.71	12 7/a
1991 a 2000	Caldwell, M. M., Dawson, T. E., & Richards, J. H. (1998). Hydraulic lift: Consequences of water efflux from the roots of plants. <i>Oecologia</i> , 113(2), 151-161. https://doi.org/10.1007/s004420050363	68 7/r
	Alarcón-Aguilara, F. J., Román-Ramos, R., Pérez-Gutiérrez, S., Aguilar-Contreras, A., Contreras-Weber, C. C., & Flores-Saenz, J. L. (1998). Study of the anti-hyperglycemic effect of plants used as antidiabetics. <i>Journal of Ethnopharmacology</i> , 61(2), 101-110. https://doi.org/10.1016/S0378-8741(98)00020-8	34 7/a
	McCully, M. E. (1999). Roots in soil: Unearthing the Complexities of Roots and Their Rhizospheres. <i>Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology</i> , 50(1), 695-718. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.695	30 1/r
2001 a 2010	Yeh, G. Y., Eisenberg, D. M., Kaptchuk, T. J., & Phillips, R. S. (2003). Systematic review of herbs and dietary supplements for glycemic control in diabetes. <i>Diabetes Care</i> , 26(4), 1277-1294. https://doi.org/10.2337/diacare.26.4.1277	51 3/r
	Louda, S. M., Pemberton, R. W., Johnson, M. T., & Follett, P. A. (2003). Nontarget effects - The Achilles' Heel of biological control? Retrospective analyses to reduce risk associated with biocontrol introductions. <i>Annual Review of Entomology</i> , 48, 365-396. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.48.060402.102800	41 8/r
	Stintzing, F. C., Herbach, K. M., Mosshammer, M. R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., Akoh, C. C., Bunch, R., & Felker, P. (2005). Color, Betalain Pattern, and Antioxidant Properties of Cactus Pear (<i>Opuntia</i> spp.) Clones. <i>Journal of Agricultural and Food Chemistry</i> , 53(2), 442-451. https://doi.org/10.1021/jf048751y	39 8/a
2011 a 2020	Ju, J., Bai, H., Zheng, Y., Zhao, T., Fang, R., & Jiang, L. (2012). A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus. <i>Nature Communications</i> , 3, 1247. https://doi.org/10.1038/ncomms2253	82 3/a

	Khalil, H. P. S. A., Bhat, A. H., & Yusra, A. F. I. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. <i>Carbohydrate Polymers</i> , 87(2), 963-979. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.078	83 5/r
	Chen, W., Yu, H., Liu, Y., Chen, P., Zhang, M., & Hai, Y. (2011). Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with chemical pretreatments. <i>Carbohydrate Polymers</i> , 83(4), 1804-1811. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.040	65 8/a
	Xie, J.-H., Jin, M.-L., Morris, G. A., Zha, X.-Q., Chen, H.-Q., Yi, Y., Li, J.-E., Wang, Z.-J., Gao, J., Nie, S.-P., Shang, P., & Xie, M.-Y. (2016). Advances on Bioactive Polysaccharides from Medicinal Plants. <i>Critical Reviews in Food Science and Nutrition</i> , 56(sup1), S60-S84. https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1069255	27 5/r
	Calogero, G., Yum, J.-H., Sinopoli, A., Di Marco, G., Grätzel, M., & Nazeeruddin, M. K. (2012). Anthocyanins and betalains as light-harvesting pigments for dye-sensitized solar cells. <i>Solar Energy</i> , 86(5), 1563-1575. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.018	26 1/a
2021 a 2022	Trajkovska Petkoska, A., Daniloski, D., D'Cunha, N. M., Naumovski, N., & Broach, A. T. (2021). Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging. <i>Food Research International</i> , 140, 109981. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109981	85/ r
	Sadowska-Bartos, I., & Bartosz, G. (2021). Biological Properties and Applications of Betalains. <i>Molecules</i> , 26(9), 2520. https://doi.org/10.3390/molecules26092520	41/ r
	Kurniawan, S. B., Imron, M. F., Chik, C. E. N. C. E., Owodunni, A. A., Ahmad, A., Alnawajha, M. M., Rahim, N. F. M., Said, N. S. M., Abdullah, S. R. S., Kasan, N. A., Ismail, S., Othman, A. R., & Abu Hasan, H. (2022). What compound inside biocoagulants/bioflocculants is contributing the most to the coagulation and flocculation processes? <i>Science of the Total Environment</i> , 806, 150902. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150902	29/ r

a= artículo científico, r = artículo de revisión.

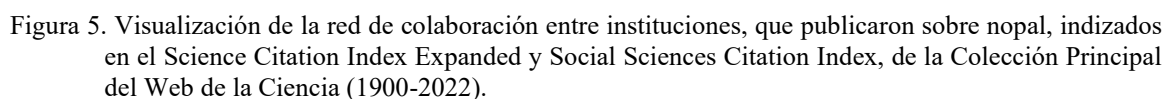
4.14 Instituciones más productivas e influyentes

Respecto a las principales instituciones y organismos de afiliación, entre las instituciones que firman el mayor número de documentos indizados en las bases de datos SCIE y SSCI, de la Colección Principal del Web de la Ciencia destacaron: la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), los Centros Públicos de Investigación del CONACYT (México) y la Universidad de California. De acuerdo con el listado que se muestra en el Cuadro 10, de entre las 20 instituciones con el mayor número de documentos publicados 14 de ellas son de México, dos de Estados Unidos (EE.UU.), dos de Italia y dos de Brasil. La institución con la mayor influencia en publicaciones, por el número de citas recibidas, destacó la Universidad de California, seguida por la UNAM, los Centros Públicos de Investigación del CONACYT y la Universidad de Palermo, en Italia. En este aspecto la lista de instituciones mexicanas se reduce a siete, aumentan a cuatro de Estados Unidos, y aparecen instituciones de Alemania, Francia, Chile, Marruecos, China y Sudáfrica; de Brasil solo aparece la Universidad Federal Rural de Pernambuco.

Cuadro 10. Instituciones con la mayor producción de documentos publicados y citados sobre nopal, indizados en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Ordenadas por documentos indizados			Ordenadas por citas recibidas		
Institución	Doctos.	Citas	Institución	Doctos.	Citas
Universidad Nacional Autónoma de México (México)	223	4696	Universidad de California (EE.UU.)	154	5895
Centros Públicos de Investigación CONACYT (México)	187	3749	Universidad Nacional Autónoma de México (México)	223	4696
Universidad de California (EE.UU.)	154	5895	Centros Públicos de investigación CONACYT, Méx.	187	3749
Instituto Politécnico Nacional (México)	142	2772	Universidad de Palermo (Italia)	109	3128
Universidad Federal Rural de Pernambuco (Brasil)	123	1096	Instituto Politécnico Nacional, IPN (México)	142	2772
Universidad Autónoma Chapingo (México)	115	890	Universidad Hohenheim (Alemania)	25	2432
Universidad de Palermo (Italia)	109	3128	Centre National de la Recherche Scientifique (Francia)	44	1811
Colegio de Postgraduados (México)	99	867	Universidad de Chile (Chile)	40	1586
Universidad Autónoma Metropolitana (México)	97	1430	Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México)	83	1492
Universidad Autónoma de San Luis Potosí (México)	83	1492	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (EE. UU.)	56	1451
Instituto Tecnológico Nacional (México)	79	1286	Universidad Autónoma de Querétaro (México)	50	1443
Universidad Aut. Estado de Hgo. Méx.	74	1392	Universidad Autónoma Metropolitana, UAM (México)	97	1430
Universidad Autónoma de Nuevo León (México)	62	990	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (México)	74	1392
Universidad Federal Paraiba (Brasil)	62	418	Instituto Tecnológico Nacional (México)	79	1286
Universidad de Guadalajara (México)	60	617	Universidad Cadi Ayyad (Marruecos)	43	1263
Depto. Agric. (EE. UU.)	56	1451	Universidad Texas A&M (EE.UU.)	43	1182
INIFAP (México)	54	696	Chinese Academy of Sciences (China)	8	1119
Universidad Autónoma de Querétaro (México)	50	1443	Universidad Federal Rural de Pernambuco (Brasil)	123	1096
Universidad de Catania (Italia)	49	806	Universidad de Ciudad del Cabo (Sudáfrica)	32	1076
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (México)	45	852	Universidad de Cornell (EE. UU.)	6	1030

El mapa de colaboración entre instituciones para generar publicaciones, muestra que los grupos se integraron por la cercanía geográfica y/o afinidad idiomática. El nodo más destacado en el mapa de visualización destaca, en verde oscuro, la Universidad Autónoma de México (UNAM), quien mantiene una alta y variada colaboración con un gran número de instituciones mexicanas, entre las que se encuentran la Universidad Autónoma Chapingo, Colegio de Postgraduados, el Instituto Politécnico Nacional y diversas universidades públicas estatales, así como con los Centros Públicos de investigación del CONACYT. Por otro lado, en verde claro, se distinguen las instituciones brasileñas, entre las que destaca la Universidad Federal Rural de Pernambuco. En el centro del mapa, en rojo se agruparon las universidades estadounidenses de California y Florida y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) así como las sudamericanas de Buenos Aires y Chile; de igual manera, aparecen la Universidad de Barcelona y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España. En azul marino se distinguen las universidades italianas de Palermo y Catania, en conjunto con Kadi Ayab, Marruecos; en azul cielo, se agruparon las instituciones sudafricanas como la Universidad de Rodhes y Ciudad del Cabo; en naranja, las universidades del Cairo y Canal de Suez. Finalmente, en morado se agruparon las universidades tunecinas: Monastir, Cártago, Gabes y Sfax, que colaboran con la Universidad Complutense de Madrid (Figura 5).



4.16 Países con mayor producción científica

De acuerdo con el análisis realizado durante el período en estudio, se registraron 113 países con al menos un documento publicado indizado en las bases de datos SCIE y SSCI, de la Colección Principal del Web de la Ciencia, lo que infiere la amplia participación e interés por el tema a nivel mundial, así como la importancia que está adquiriendo en algunos países. México destacó como el país con el mayor número de contribuciones hasta 2022, seguido de EE.UU. y Brasil, los tres de América; luego aparecen dos países europeos, Italia y España. Posteriormente aparecen los países africanos como Sudáfrica, Túnez y Marruecos (Figura 6 y Cuadro 10). Es importante destacar dos aspectos de interés: el primero de ellos, se relaciona a qué con excepción de algunos países, como Paraguay y la Guyana Francesa, prácticamente todos los países de las Américas participaron en publicaciones sobre el tema. El otro punto destacable es la tendencia a incrementar su multiplicación y aprovechamiento, en el norte, sur y oriente de África, que se reflejó en un incremento de contribuciones.

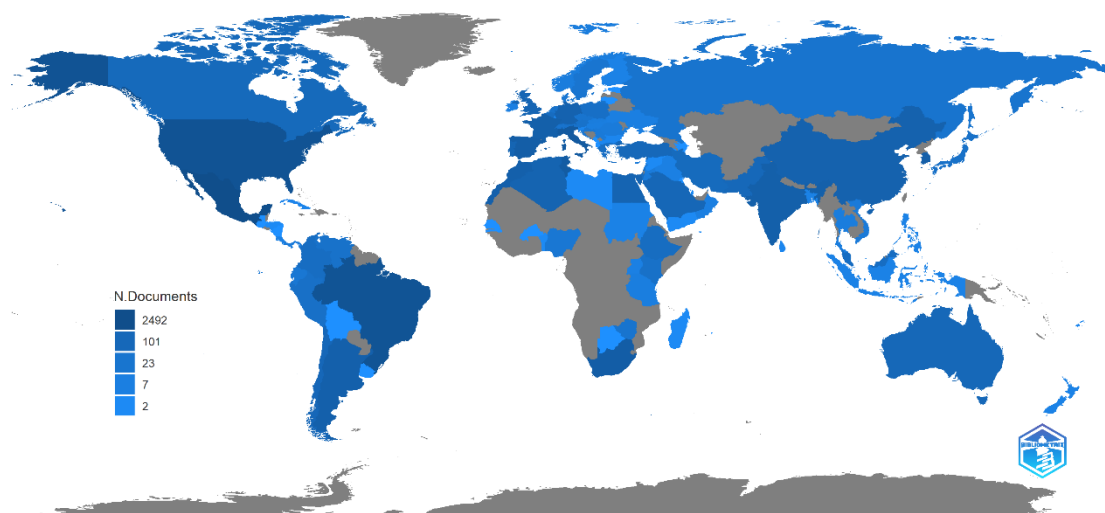


Figura 6. Mapa de países el mayor número de contribuciones relacionadas al nopal, indizados en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

A pesar de que México registró el mayor número de publicaciones relacionadas al nopal, EE.UU. resultó el país con mayor influencia (por el número total de citas recibidas) en la generación de nuevo conocimiento. Sin embargo, el país que obtuvo el mayor número de citas por documento fue Malasia, seguida de China, Alemania y Brasil (Cuadro 11). Otros países que también destacaron, en cuanto al número de citas recibidas por documento, son: Chile, Sudáfrica, Inglaterra y EE. UU., por lo que podrían ser considerados los países con mayor liderazgo científico.

4.17 Cooperación entre países

Al igual que la colaboración entre instituciones, respecto a la cooperación entre países, se observó una tendencia similar, ya que éstos se relacionaron, principalmente, por su cercanía geográfica y la afinidad idiomática. Por ejemplo, de acuerdo con la dimensión del nodo, en verde claro el país que registró una mayor colaboración a nivel internacional fue México, ya que mantiene estrechas redes de colaboración con EE.UU. y Canadá, con quienes tiene cercanía geográfica, al igual que con Brasil, España y Argentina, éstos dos últimos por

compartir idioma. También, mantiene vínculos de colaboración con diversos países de América Latina y el Caribe como: Perú, Colombia, Ecuador, Venezuela y Cuba, entre otros (Figura 6).

En esta misma Figura destacan tres nodos importantes que colaboran entre sí: los europeos, en verde oscuro, integrados por Italia, Francia, Portugal, en conjunto de algunos países del norte de África como Túnez, Marruecos y Argelia; en rojo se distingue un grupo asiático entre los que se encuentran China, India, Turquía, Egipto, Arabia Saudita, Corea del Sur y Japón, acompañados de Nigeria. Finalmente, en azul, se distingue el grupo conformado por Sudáfrica, Australia, Alemania e Inglaterra, Países Bajos, acompañados por Etiopía y Kenia.

Cuadro 11. Países con la mayor producción científica e influencia en la generación de nuevas investigaciones, según el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

Ordenados por documentos indizados			Ordenados por citas obtenidas			
País	Doctos.	Citas	País	Doctos.	Citas	Citas / Documento
México	1038	17534	EE.UU.	760	22974	30.23
EE.UU.	760	22974	México	1038	17534	17.89
Brasil	441	5100	Italia	296	7885	26.64
Italia	296	7885	España	226	6318	27.96
España	226	6318	Francia	171	5169	30.29
Túnez	203	4110	Alemania	127	5134	40.43
Sud África	175	4104	Brasil	441	5100	40.16
Francia	171	5169	China	94	4736	50.36
Argentina	141	2087	Túnez	203	4110	20.24
India	137	2587	Sudáfrica	175	4104	32.45
Alemania	127	5134	marruecos	125	3153	25.24
Marruecos	125	3153	Inglaterra	90	2759	30.66
Corea del Sur	115	2266	India	137	2587	18.89
China	94	4736	Corea del Sur	115	2266	19.71
Inglaterra	90	2759	Chile	56	2140	38.21
Argelia	81	933	Canadá	75	2113	21.17
Canadá	75	2113	Argentina	141	2087	14.81
Arabia Saudita	75	775	Egipto	73	1664	22.79
Egipto	73	1664	Malasia	28	1559	55.68
Portugal	73	1318	Australia	62	1492	24.06

4.18 Temáticas de investigación

El mapeo de las temáticas de investigación permitió identificar seis grandes tópicos abordados (Figura 7). El grupo en color morado incluyó información relacionada a la actividad antioxidante y compuestos bioactivos presentes en los frutos del nopal; así como la composición y calidad de éstos para consumo humano, particularizando entre otros, aspectos de encapsulación y la estabilidad de los pigmentos. En verde claro, destacan temas relacionadas a sus propiedades antioxidantes, el empleo de la semilla como fuente de aceite de alta calidad, así como su potencial en la salud humana (antidiabético, antiobesidad y anticancerígeno); aunque es necesario destacar que la mayoría de dichos estudios han sido realizados in vitro. En color verde oscuro, se conjuntan las aportaciones sobre la optimización y extracción de mucílagos, polisacáridos y pectinas, y su empleo en el tratamiento de aguas residuales y floculación. En la parte media de la red se visualiza, en azul cielo, la calidad de los frutos y los principales cultivares evaluados. En rojo se conjuntaron temáticas relacionadas a aspectos de ecología y fisiología sobresaliendo morfología, anatomía, diversidad, semillas y el control biológico del nopal como maleza invasora. Finalmente, en azul marino, se agrupan los temas de crecimiento, temperatura, metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por sus siglas en inglés), la producción de biomasa para forraje y bioenergía y su digestibilidad para la alimentación animal, y el aprovechamiento de las variedades sin espinas con fines hortícolas.

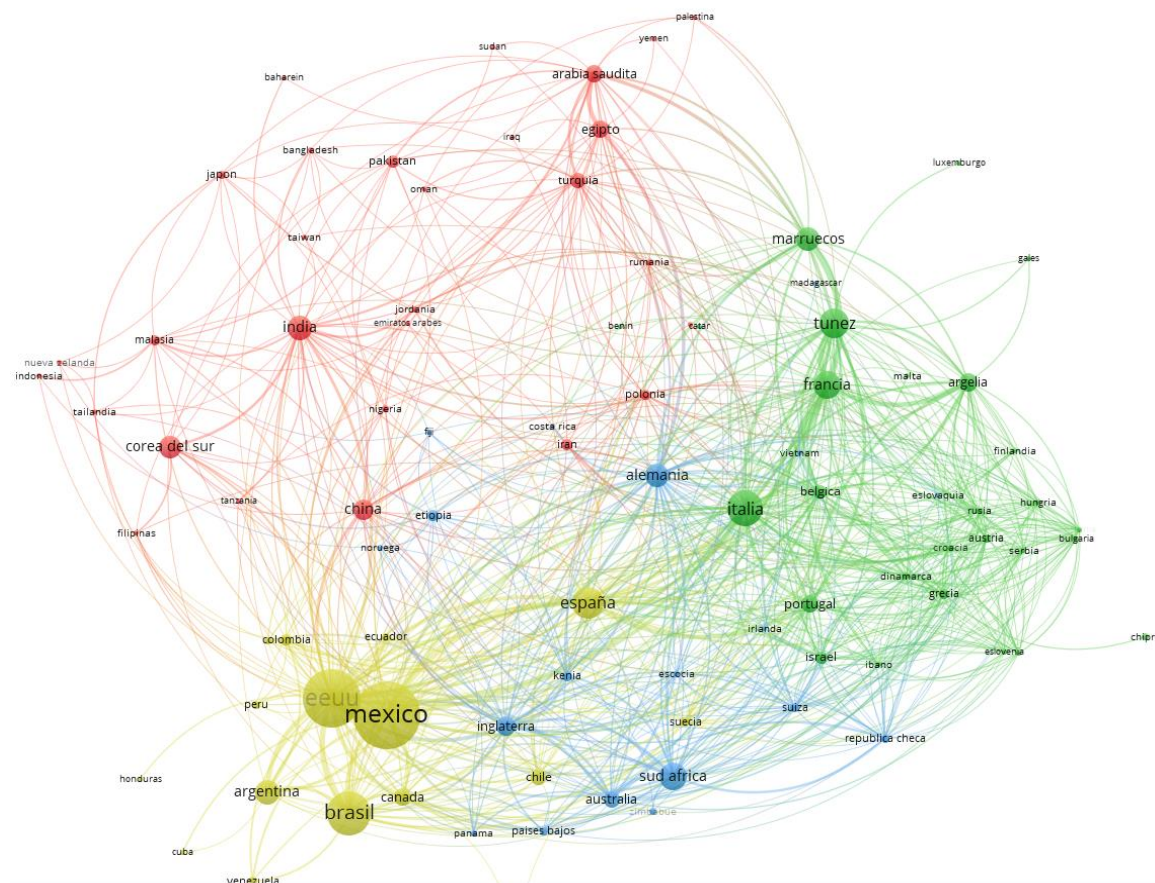


Figura 6. Mapa de la colaboración entre países que participan en la producción científica sobre nopal indizados en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

4.19 Tendencias de investigación

Las temáticas de investigación sobre nopal han sufrido una notable diferenciación, en función del período de estudio; esto se puede distinguir en la visualización de la red temática de la investigación, elaborada a partir del análisis de palabras conjuntas (Figura 8). En esta Figura, es posible distinguir en los colores más claros las temáticas más recientes y emergentes tales como: capacidad antioxidante, compuestos bioactivos, microencapsulación y tratamiento de aguas residuales, entre otros; en colores oscuros se destacan los temas que han permanecido más tiempo de investigarse destacando entre ellos: hábitat, crecimiento, rendimiento, morfología, plantas CAM, el efecto de la temperatura, control del nopal como maleza y su uso como forraje.

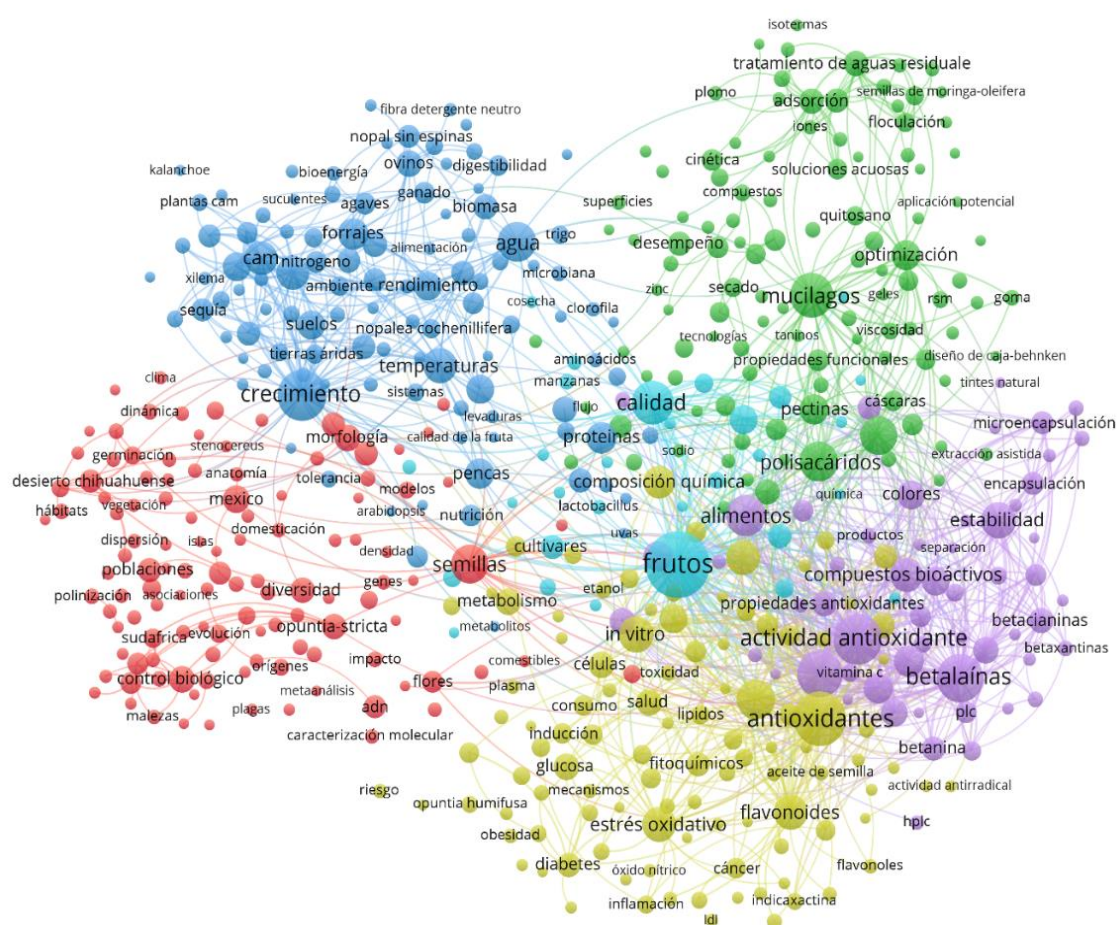


Figura 7. Visualización de las temáticas de investigación sobre nopal, con 12 o más repeticiones de los descriptores temáticos, en las publicaciones indizadas en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

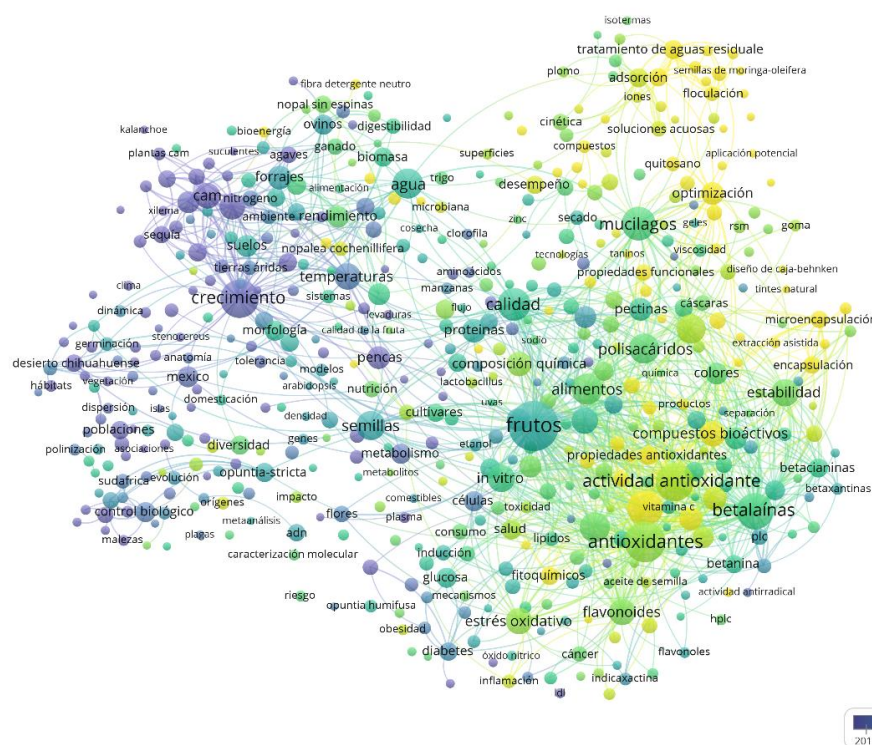


Figura 8. Actualidad de las temáticas de investigación sobre nopal con 12 o más repeticiones, empleados en los descriptores temáticos sobre nopal, consideradas en las publicaciones indizadas en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1900-2022).

El Cuadro 12 muestra las palabras clave o descriptores sobre nopal registrados en tres diferentes periodos de tiempo: 1991-2000, 2001-2010 y 2022-2022, lo cual confirma lo que se muestra en la Figura 8, respecto a las tendencias de investigación. En este contexto, se observa que durante los últimos 12 años la investigación se ha focalizado principalmente sobre: *actividad antioxidante*, *compuestos fenólicos*, *betalainas*, *flavonoides*, *compuestos bioactivos*, *mucilagos*, *calidad* y *estrés oxidativo*, entre otras temáticas.

De acuerdo al espaciamiento temporal empleado, la Figura 9A muestra la densidad de los temas de investigación durante el periodo 1991- 2000, en la que se destaca como temas centrales los términos: crecimiento, el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por sus siglas en inglés), temperatura, relaciones hídricas, frutos y calidad, forraje y *Cactoblastis cactorum* (agente de biocontrol del nopal y su potencial invasión de éste en algunas en algunas regiones del mundo), de manera incipiente comienzan a aparecer investigaciones relacionadas a diabetes. Durante el periodo de 2001 a 2010 los términos más destacados resultaron: frutos y su calidad, empiezan también a destacarse los estudios sobre caracterización química (Figura 9B). Finalmente, en la Figura 9C los temas investigados durante los últimos 12 años resalta, particularmente: actividad antioxidante de los frutos del nopal; así como el uso para controlar la glucosa y el colesterol, y el tratamiento de aguas residuales; se destaca en este último periodo que los temas de crecimiento y el metabolismo ácido de la crasuláceas, forrajes, y control biológico continúan apareciendo de manera recurrente como temas actuales de investigación.

Cuadro 12. Veinticinco (25) descriptores o palabras clave más frecuentes sobre nopal registrados en los documentos indizados, en el Science Citation Index Expanded y Social Sciences Citation Index, de la Colección Principal del Web de la Ciencia (1991-2022), en tres periodos*.

1991-2000		2001-2010		2011-2022	
Descriptor	Nú mero	Descriptor	Nú mero	Descriptor	Nú mero
Crecimiento	26	Betalainas	32	Frutos	326
Co ²	24	Calidad	29	Antioxidantes	264
Frutos	22	Antioxidantes	25	Actividad	238
CAM	20	Alimentos	18	Antioxidante	205
Cladodios	15	Almacenamiento	16	Compuestos	199
Agua	13	Actividad	14	Fenólicos	194
Temperatura	12	Antioxidante	14	Betalainas	164
Reacciones	11	Argentina	13	Crecimiento	146
Productividad	10	Agua	11	Mucilagos	145
Relaciones Hídricas	10	Biomasa	10	Calidad	145
Almacenamiento	9	Alimentos	10	Extractos	132
Características	9	Funcionales	10	Agua	132
Fotosintéticas	9	Betanina	10	Extracción	130
Fotosíntesis	9	Calcio	7	Polisacáridos	114
Raíces	9	ADN	7	In Vitro	113
Cactoblastis	8	Adsorción	7	Estabilidad	110
Cactorum	8	Análisis Sensorial	6	Compuestos	108
Lepidoptera	8	Acumulación	6	Bioactivos	106
Agaves	7	Actividad	6	Semillas	104
Carbono	7	Antirradical	6	Flavonoides	96
Competencia	7	Beta Vulgaris	6	Estrés Oxidativo	93
Cultivos	7	Betacianinas	6	Ácidos	93
Células	7	Cactoblastis	5	Composición	91
Forrajes	7	Cactorum	5	Química	87
Metabolismo	7	Absorción	5	Polifenoles	84
Calidad	6	Análisis Estadístico	5	CAM	84
Control Biológico	6	Azúcares	5	Optimización	84
		Calor	5	Capacidad	84
		Capacidad	5	Antioxidante	84

*Los registros del periodo 1900-1990 no contienen palabras clave.

.20 Conclusiones

Los estudios bibliométricos brindan una excelente panorámica de la actividad científica y sus tendencias, por lo que este capítulo aporta valiosa información acerca de la dinámica de la temática relacionada al nopal, que permitirá la toma de decisiones para incrementar la calidad de la investigación científica y la visibilidad de autores y revistas. Sobre todo, si se considera que las temáticas de investigación actuales serán la base de las líneas a desarrollar en el futuro.

El análisis bibliométrico permitió corroborar que las Américas es la región geográfica donde se ha desarrollado la mayor investigación de la temática; lo cual coincide con el centro de origen del género. Una importante área emergente es la cuenca del Mediterráneo, donde se ha generado información científica recientemente.

Futuras estrategias deberían ir enfocadas a consolidar, inicialmente, la integración de los cuerpos de investigación a nivel nacional, para posteriormente vincularse con grupos de otras áreas geográficas. Asimismo, es necesario fortalecer y potenciar el capital humano para establecer estrategias de actuación eficaces, que faciliten dinamizar la competitividad del sistema agroindustrial del nopal a nivel internacional.

Los resultados obtenidos en el estudio permitieron caracterizar la producción científica relacionada al nopal, la cual se encuentra en pleno desarrollo. Sin embargo, es necesario considerar que sólo se cuenta con una visión parcial de la situación actual, ya que aquellas publicaciones no indizadas en otras bases de datos referenciales (PubMed, Scopus, Scielo, etc.) no se muestran en esta investigación.

La temática de investigación se amplía y diversifica, conforme avanza el desarrollo científico y se aplican nuevas técnicas y metodologías, que han permitido mayores avances, sobre todo en el área de ciencias de la salud y alimentarias.

V. Literatura citada

- Abbas, E. Y., Ezzat, M. I., El Hefnawy, H. M. y Abdel-Sattar, E. 2022. An overview and update on the chemical composition and potential health benefits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Journal of Food Biochemistry, e14310.1-26 p.
- Bravo-Vinaja, Á. y S. de J. Méndez-Gallegos. 2016. Production and trends of scientific research on cactus pear in mainstream journals. Journal of the Professional Association for Cactus Development, 18:87-102.
- Castellano, J., Marrero, M. D. y Ortega, Z. 2022. *Opuntia* Fiber and its potential to obtain sustainable materials in the composites field: A review. Journal of Natural Fibers, 19(15):10053-10067.
- Chen, M., Yang, H., Song, Z., Gu, Y., Zheng, Y., Zhu, J., Wang, A. y Fu, L. 2021. Knowledge Mapping of *Opuntia Milpa Alta* since 1998: A Scientometric Analysis. Phytom, 90(5):1507-1518.
- Ciriminna, R., Delisi, R., Albanese, L., Meneguzzo, F. y Pagliaro, M. 2017. *Opuntia ficus-indica* seed oil: Biorefinery and bioeconomy aspects. European Journal of Lipid Science and Technology, 119(8):1700013.

- Daniloski, D., D'cunha, N. M., Speer, H., McKune, A. J., Alexopoulos, N., Panagiotakos, D. B., Petkozka, A. T. y Naumovski, N. 2022. Recent developments on *Opuntia* spp., their bioactive composition, nutritional values, and health effects. Food Bioscience, Vol (47): 101665.
- de Andrade Vieira, É. y de Magalhães Cordeiro, A. M. T. 2022. Bioprospecting and potential of cactus mucilages: A bibliometric review. Food Chemistry, 401: 1-18.134121.
- de Souza Ferraz, R. L., da Silva Costa, P., Neto, J. D., dos Anjos, F. A., Barreto, N. P., da Silva Soares, L., Magalhães, I. D. y de Andrade Barbosa, M. 2017. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.(Cactaceae) in Climate Change Scenarios and Its Potential for Wastewater Bioremediation in Semi-Arid Regions: A Systematic Review and Meta-Analysis. Journal of Experimental Agriculture International, 18(3):1-11. Article no. JEAI.36730.
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N. y Lim, W. M. 2021. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research, 133:285-296.
- Dubeux Jr, J. C. B., dos Santos, M. V. F., da Cunha, M. V., dos Santos, D. C., de Almeida Souza, R. T., de Mello, A. C. L. y de Souza, T. C. (2021). Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. Animal Feed Science and Technology, 275, 114890.
- Durazzo, A., Lucarini, M., Nazhand, A., Raffo, A., Souto, E. B., Lombardi-Boccia, G., Santini, A. y Lupotto, E. 2021. *Opuntia* spp. Chemical Constituents and Bioactive Compounds, with Particular Regards to Polyphenols. In: Ramadan, M. F., Ayoub, T.E.M. & Rohn, S. (eds). *Opuntia* spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications, (pp. 331-343). Cham: Springer International Publishing.
- García-Fernández, J. M., Inglés, C. J., Vicent, M., Gonzálvez, C., Gómez-Núñez, M. I. y Poveda-Serra, P. 2016. Perfeccionismo durante la infancia y la adolescencia. Análisis bibliométrico y temático (2004-2014). Revista Iberoamericana de Psicología y Salud, 7(2): 79-88.
- Griffith, P. M. 2004. The origins of an important cactus crop, *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae): New molecular evidence. American Journal of Botany 9(11):1915-1921.
- Grünwaldt, J. M., Guevara, J.C. y Grünwaldt, E. G. 2015. Review of scientific and technical bibliography on the use of *Opuntia* spp. as forage and its animal validation. Journal of the Professional Association for Cactus Development 17:13–32.
- Hikal, W. M., Said-Al Ahl, H. A. y Kačániová, M. 2021. A review of antimicrobial activities of cactus (*Opuntia ficus-indica*). Asian Journal of Research in Biosciences, 3(2):49-56.
- Hirsch, J. E. 2005. An index to quantify an individual's scientific research output. Proceedings of the National academy of Sciences, 102(46):16569-16572.

- Hu, Z. y Wu, Y. 2014. Regularity in the time-dependent distribution of the percentage of never-cited papers: An empirical pilot study based on the six journals. *Journal of Informetrics*, 8(1):136-146.
- Inglese, P., Liguori, G. 2010. Growing cactus pear *O. ficus-indica* (L.) Mill. The contribution of the scientific research on plant ecophysiology and biology [Online]. In: International Congress on cactus pear and cochineal (7: 2010: Agadir, Maroc). Association Marocaine de Développement du Cactus (ANADEC). Disponible en: Accesado 13 febrero 2023.
- Madrigal-Santillán, E., Portillo-Reyes, J., Madrigal-Bujaidar, E., Sánchez-Gutiérrez, M., Mercado-Gonzalez, P. E., Izquierdo-Vega, J. A., Vargas-Mendoza, N., Álvarez-González, I., Fregoso-Aguilar, T., Delgado-Olivares, L., Morales-González, A., Anguiano-Robledo, L. y Morales-González, J. A. 2022. *Opuntia* genus in Human Health: A Comprehensive Summary on Its Pharmacological, Therapeutic and Preventive Properties. Part 1. *Horticulturae*, 8(2), 88.
- Majure, L. C., Puente, R., Griffith, P.M., Judd, W. S., Soltis, P. S. y Soltis, D. E. 2012. Phylogeny of *Opuntia* s. s. (Cactaceae): clade delineation, geographic origins, and reticulate evolution. *American Journal of Botany* 99(5):847-864.
- Manzur-Valdespino, S., Arias-Rico, J., Ramírez-Moreno, E., Sánchez-Mata, M. D. C., Jaramillo-Morales, O. A., Angel-García, J., Zafra-Rojas, Q.Y.; Barrera-Gálvez, R. y Cruz-Cansino, N. D. S. 2022. Applications and Pharmacological Properties of Cactus Pear (*Opuntia* spp.) Peel: A Review. *Life*, 12(11):1903.
- Moral-Muñoz, J. A., Herrera-Viedma, E., Santisteban-Espejo, A. y Cobo, M. J. 2020. Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review. *Profesional de la Información*, 29(1).
- Nobel, P. S. 1991. Achievable productivities of certain CAM plants: Basis for high values compared with C3 and C4 plants. *New Phytologist*, 119(2):183-205.
- Onakpoya, I. J., O'Sullivan, J. y Henegahn, C. J. 2015. The effect of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) on body weight and cardiovascular risk factors: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Nutrition* 31(5): 640-645.
- Pastorelli, G., Serra, V., Vannuccini, C., y Attard, E. 2022. *Opuntia* spp. as Alternative Fodder for Sustainable Livestock Production. *Animals*, 12(13):1597.
- Price, D. de S. y Gürsey, S. 1975. Studies in Scientometrics I Transience and Continuance in Scientific Authorship. *Ciência da Informação*, 4(1):
- Pritchard, A. 1969. Statistical bibliography or bibliometrics?. *Journal of Documentation*, 25(4):348-349, Dec. Publicado dentro de: Gross Ole V. & Pritchard Alan. (1969). *Documentation Notes*. *Journal of Documentation*, 25(4):344-349.
- Ramadan, M. F., Moussa Ayoub, T. E. y Rohn, S. 2021. Introduction to *Opuntia* spp.: Chemistry, bioactivity and industrial applications. In: Ramadan, M. F., Ayoub, T.E.M. & Rohn, S. (eds). *Opuntia* spp.: Chemistry, Bioactivity and Industrial Applications (pp. 3-11). Cham: Springer International Publishing.

- Rebman, J. P. y Pinkava, D. J. 2001. *Opuntia* cacti of North America: an overview. Florida Entomologist, 84(4): 474-483.
- Rodríguez, A. R. R., y Sancho, M. P. L. 2020. Patrones de coautoría en las publicaciones españolas en ciencias económicas y empresariales indexadas en el SSCI. Revista de Estudios Empresariales. Segunda Época, (1):113-136.
- Ruiz-Pomeda, A., Álvarez-Peregrina, C. y Povedano-Montero, F. J. 2020. Bibliometric study of scientific research on optometric visual therapy. Journal of Optometry, 13(3):191-197.
- Schimmer, R., Geschuhn, K. K. y Vogler, A. 2015. Disrupting the subscription journals' business model for the necessary large-scale transformation to open access.
- Sanz Casado, E., García Zorita, C., Serrano-López, A., de Filippo, D. y Vanti, N. 2016. Desarrollo de indicadores para los nuevos hábitos de información y comunicación científica. Educación Médica, 17(Supl 2):45-50.
- Silva, M. A., Albuquerque, T. G., Pereira, P., Ramalho, R., Vicente, F., Oliveira, M. B. P. y Costa, H. S. 2021. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: A multi-benefit potential to be exploited. Molecules, 26(4):951.
- Spinak, E. 1996. Los análisis cuantitativos de la literatura científica y su validez para juzgar la producción latinoamericana. Boletín de La Oficina Sanitaria Panamericana (OSP);120(2).
- Stavi, I. 2022. Ecosystem services related with *Opuntia ficus-indica* (prickly pear cactus): a review of challenges and opportunities. Agroecology and Sustainable Food Systems, 46(6):815-841.
- Thuiller, W., Richardson, D. M., Rouget, M., Proches, S. y Wilson, J. R. U. 2006. Interactions between environment, species traits, and human uses describe patterns of plant invasions. Ecology, 87(7):1755-1769.
- Urrea-Solano, M., Martínez-Roig, R. y Merma-Molina, G. 2022. Las competencias digitales en Iberoamérica en tiempos de COVID-19: análisis bibliométrico. Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología, (31):133-145.
- van Eck, N. J. y Waltman, L. 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, 84(2):523-538.
- Velázquez López, D., Robledillo Colmenares, A., Mangas Gallardo, I., Veiga-Cabo, J., y Maqueda Blasco, J. 2013. Análisis bibliométrico de la revista Medicina y Seguridad del Trabajo durante el periodo 2007-2012. Medicina y Seguridad del Trabajo, 59(233):383-392.



1. CRITERIOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL NOPAL

¹Ortiz Robles M. D. ¹Silos Espino H., ¹Valera Montero L. L. ¹Flores Benítez S.,
¹Perales Segovia C., ²López Muraira I. G. y ³Cruz Cárdenas C. I.

¹TecNM-Instituto Tecnológico El Llano, Aguascalientes. Km 18 carretera Aguascalientes-San Luis Potosí, 20330. México.

²TecNM-Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Km 10 carretera a San Miguel Cuyutlán, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco 45640. México.

³Centro Nacional de Recursos Genéticos, INIFAP. Km 8 carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, 47600. México.

Correspondencia: ORMD, ORCID: 0000-0001-7081-696X, maria.or@llano.tecnm.mx

Tema	Página
I. Resumen.	36
II. Introducción.	37
III. El nopal, una planta de México.	38
3.1 Origen de la palabra nopal.	38
3.2 Centro de origen.	38
3.3 Distribución geográfica.	38
IV. Consideraciones sobre la clasificación del género <i>opuntia</i>	40
4.1 Clasificación taxonómica.	40
4.2 Elementos morfológicos para identificar especies de nopal y su grado de domesticación.	42
4.3 Los genotipos de nopal más conocidos.	42
4.4 Claves de la UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones).	42
4.5 Número de cromosomas.	52
4.6 Formas de las semillas.	53
4.7 Microfotografías de espinas y epidermis.	54
4.8 Aplicación de herramientas moleculares.	55
4.9 Perspectiva.	56
V. Literatura citada.	57

I. Resumen

El nopal (*Opuntia* spp) es uno de los géneros más antiguos e importantes en México, debido a su alto potencial agrotecnológico ya que de él se obtienen diversos productos que se utilizan en la industria alimentaria, ecología, farmacología y medicina por mencionar algunos. Además, de ser *Opuntia ficus indica* la especie que se encuentra mayormente distribuida en nuestro país, específicamente en el centro y norte del Altiplano, el noroeste, el Bajío, el Eje Neovolcánico y el valle de Tehuacán-Cuicatlán (Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí,

Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Ciudad de México, Tlaxcala, Puebla, Jalisco y Michoacán) contando con entre 60 y 90 especies según la literatura. Este género es muy complejo debido a diferentes factores como la alta polinización, la hibridación, la poliploidía y los procesos de domesticación, lo que hace que la delimitación de especies sea un reto para los taxónomos. Por lo que es necesario recurrir a técnicas más especializadas utilizando marcadores moleculares que permitan distinguir estas especies de manera rápida y confiable.

II. Introducción

El nopal se ha visto ligado a la historia de México desde sus orígenes, puesto que una gran proporción de las especies de esta planta, encuentran su origen geográfico en las zonas áridas y semiáridas del país el cual es centro de diversidad de este género de cactáceas, fuente principal de la economía mexicana. Hace 20 mil años, aproximadamente, cuando los primeros pobladores llegaron a La Cuenca de México y vivían como nómadas cazadores y recolectores, encontraron varios géneros de cactus de los cuales se alimentaban. El nopal posee los registros más antiguos conocidos. Este vegetal habría sido domesticado hace 9 mil años y, junto con el maguey, el maíz y el frijol, fue el alimento principal de los grupos chichimecas. Ellos lo llamaron *nopalli*, voz náhuatl que se transformó en nopal a la llegada de los españoles (SEMARNAT, 2017).

El nopal es un recurso que tiene un alto potencial agrotecnológico, como elemento base para productos derivados, que se utilizan en la industria alimenticia (humana y animal), la farmacología, la medicina, si se procesan se obtiene fibra deshidratada, jugo con propiedades hipoglucemiantes y mucílago (Aguilar *et al.*, 2008).

En el 2019 en México se sembraron 12 mil 799 hectáreas de nopal verdura a nivel nacional, con una producción de 891 mil 821 toneladas y un rendimiento promedio de 71 toneladas por hectárea. Actualmente se registra una tendencia en el incremento de la producción de nopal, en gran parte impulsada por el descubrimiento de sus propiedades (SADER, 2020).

Existen estudios basados en experiencias de evaluación de poblaciones de amplia base genética para la selección paulatina de cultivares adaptados a condiciones críticas de aridez en México gracias al apoyo de la Secretaría de Desarrollo Rural quien impulsa este sector productivo para la conservación y aprovechamiento de recursos genéticos de nopal y tuna, apoyando los trabajos de colecta y conservación de variedades de dominio público (SADER, 2020).

Actualmente en diferentes partes del mundo, se llevan a cabo investigaciones para conocer las diversas propiedades que posee el nopal. Por lo cual en este proyecto se analizan las estrategias que se han utilizado para identificar o caracterizar los genotipos de nopal hasta definir su ubicación taxonómica.

III. El nopal, una planta de México

3.1 Origen de la palabra nopal

El nopal tiene su origen en un pueblo antiguo de Grecia llamado *Opus* u *Opuncia*, de la región de Leócrida, Beocia, en esta región se dice que crecían plantas que tenían características similares a las cactáceas. Los nopales son las cactáceas que se encuentran mayormente distribuidas en todo el continente americano, particularmente en zonas con climas áridos y semiáridos. Linneo las nombró como *Cactus opuntia* en 1753, pero años más tarde Miller decidió corregir a *Opuntia ficus-indica* y fue considerada como una especie muy amplia debido a la gran cantidad de variedades que existen dentro de la misma especie (Guzmán, U., 2003).

3.2 Centro de origen

México es considerado como el mayor centro de diversificación del género *Opuntia*, aunque algunos autores lo consideran también como centro de origen por el gran número de especies que se encuentran distribuidas en todo el país. De manera específica, se considera que La Cuenca de México (donde se fundó la gran Tenochtitlán) es actualmente el hábitat de un número considerable de especies de nopales endémicos de México. Encontrando principalmente a *Opuntia Streptacantha* o nopal cardón la cual en diversos artículos mencionan que podría ser el ancestro de algunas de las especies domesticadas que conocemos hoy en día como *Opuntia ficus-indica* de tunas verdes y amplia distribución, pero también se menciona al nopal chamacuelo (*Opuntia tomentosa* y al de espinas lacias *Opuntia lasciacantha*), de flores naranja y tunas rojas, mientras otros sostienen que se trataba de la chumbera, *Opuntia dejecta*, de distribución más tropical, por sus flores largas y con pistilo y estambres sobresalientes. Al colonizar estas tierras los españoles se sorprendieron al encontrar el *nopalli*, que en náhuatl quiere decir árbol que lleva tunas (SEMARNAT, 2017).

3.3 Distribución Geográfica

Estudios indican que la distribución del nopal se presenta desde Canadá hasta la Patagonia (desde el nivel del mar hasta los 3,800 m de altitud) con un número que aún no se conoce del todo pero que oscila entre las 1,500 especies. Además de que en la región centro-norte de México se encuentra uno de los principales centros de diversificación de los géneros *Opuntia* y *Mammillaria*, cuyo número de especies podría comprender casi el 20% del total de la familia. En México la familia *Cactaceae* Lindl; es la quinta familia con el mayor número de especies y endemismo en el país. De ahí se desprende el género *Opuntia* Mill es uno de los más importantes, diversos y complejos. Se tiene una estimación que hasta la fecha abarca entre 191 a 215 especies. Específicamente en México existe una amplia diversidad del género *Opuntia*, habiendo 103 especies silvestres, de las cuales 93 son

consideradas endémicas del país. Un grupo de 29 especies se distribuyen principalmente en el Altiplano Meridional (Aguascalientes, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Ciudad de México, Jalisco e Hidalgo) (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021). En la Figura 1 y Cuadro 1 se indican la distribución de genotipos representativos de México.

Fue llevado a Europa por los españoles, ya que los marineros acostumbraban llevar con ellos una buena dotación de tunas para evitar el escorbuto (enfermedad producida por el déficit de vitamina C). Para posteriormente llevarse variedades de nopales seleccionados y así establecer plantaciones con diversos fines como detener la desertización de los suelos o producir forraje. Debido a esto, en la actualidad algunos países cuentan con plantaciones más grandes que las de México y con recursos genéticos que allí se han diversificado (CONABIO, 2021).



Figura 1. Ubicación geográfica de especies de nopal en México.

Cuadro 1. Biodiversidad de especies de nopales silvestres en México publicado hasta el 2011.

Referencia	Britton y Rose, 1920.	Bravo- Hollis, 1978.	Hunt, 1999.	Anderson, 2001.	Guzmán <i>et al.</i> , 2003.	Scheinvar, 2010; Léia Acelkrad 2011.
Número de especies	58	66*	93	181	83**	93

*más 34 infra especies**más 8 infra especies.

Fuente: Modificado de Esparza-Sandoval, 2010.

IV. Consideraciones sobre la clasificación del género *Opuntia*

Debido a su alta tasa de hibridación, poliploidía, polinización y procesos de domesticación, el nopal es una cactácea que varía en cuanto a sus características morfológicas, bioquímicas y genéticas. lo que hace que sea una planta muy compleja de diferenciar taxonómicamente. Este comportamiento se debe principalmente a que las especies de este género florecen al mismo tiempo, lo que provoca el entrecruzamiento inter e intra específico; además, la mayoría de los híbridos son fértiles y la mayoría de los nopales actuales (63.3%) son poliploides, lo que sugiere el origen de muchas especies y/o variedades por este fenómeno, aunque por lo general los híbridos reflejan codominancia de caracteres de ambos antecesores. Como resultado de la antigua y continua selección de las plantas por sus frutos y tallos, se han mantenido muchas variedades ligeramente diferentes en este género (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021).

4.1 Clasificación taxonómica

La familia *Cactaceae* Lindl. forma parte del orden *Caryophyllales*. Es una familia nativa de América del Norte. La primera clasificación de la familia se basó únicamente en sus características morfológicas. Britton y Rose propositieron 122 géneros divididos en tres tribus: *Pereskiae*, *Opuntiae* y *Cerea*. Posteriormente, se consideró la existencia de hasta 233 géneros. En su trabajo sobre las cactáceas de México, Helia Bravo adoptó esta última clasificación, dividiendo la familia en tres subfamilias: *Pereskioideae*, *Opuntioideae* y *Cereoideae*, con 67 géneros. Guzmán *et al.* realizaron la verificación más reciente de las taxas de *Cactaceae* para el territorio mexicano, registrando 68 géneros y 689 especies, principalmente basándose en la clasificación propuesta por Hunt él dividió la familia en cuatro subfamilias: *Pereskioideae*, *Maihuenoideae*, *Opuntioideae* y *Cactoideae*. Estos consensos se basaron en la filogenia y la sistemática molecular. De acuerdo con las

clasificaciones modernas de las cactáceas, la subfamilia *Opuntioideae* es la segunda más extensa. En su filogenia se presentan cinco tribus. *Austrocylindropuntieae*, *Tephrocacteae*, *Pterocacteae*, *Opuntieae* y *Cylindropuntieae*, estas dos últimas constituyen los nopales y las choyas, con diez y siete géneros respectivamente. La subfamilia *Opuntieae* incluye los géneros *Brasiliopuntia* (K. Schumann) A. Berg., *Consoleae* Lemaire, *Miqueliopuntia* Fric ex F. Ritter, *Nopalea* Salm- Dyck, *Opuntia* Mill., *Salmiopuntia* Fric ex Guiggi, *Tacinga* Britton & Rose y *Tunilla* Hunt & Illiff.

La especie *Opuntia* tenía hasta 13 subgéneros, pero su número se ha reducido debido a las clasificaciones modernas y se ha dividido en varios géneros como *Austrocylindropuntia*, *Backeb.*, *Brasiliopuntia* (K. Schum.) A. Berger y *Cylindropuntia* (Engelm.) F.M. Kunth. El género *Opuntia* spp., también conocido como *Platyopuntia* por Britton y Rose (Cuadro 2), es el más representativo y tiene la mayor variedad de especies debido a sus cladodios planos y alargados en forma de raqueta. Su circunscripción aún no está del todo clara, y los estudios moleculares indican la existencia de taxas polifiléticas. La taxonomía de las *Opuntia* es complicada porque la mayoría de los sistemas de clasificación contienen errores en los conceptos de género y especie, lo que provoca mucha sinonimia. Además, su origen reciente las mantiene en un estado activo de evolución y diferenciación. (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021).

Cuadro 1. Taxonomía del género *Opuntia*

Reino	Plantae
Subreino	Embryophyta
División	Angiosperma
Clase	Dicotyledoneae
Subclase	Dialipétalas
Orden	Opuntiales
Familia	Cactaceae
Tribu	Opuntiae
Subfamilia	Opuntioideae
Género	Opuntia
Subgénero	PlatyOpuntia
Especie	Varios nombres

Fuente: (Cruz-Cárdenas C. *et al.*, 2021).

4.2 Elementos morfológicos para identificar especies de nopal y su grado de domesticación

Las plantas del género *Opuntia* poseen rasgos morfológicos característicos como:

- Artículos aplanados en forma de raqueta, llamados también cladodios o pencas;
- Hojas cónicas prontamente caducas, sólo en la etapa temprana de los cladodios;
- Areolas con pelos o fieltro blanco;
- Glóquidas (ahuates) numerosas;
- Espinas sin vaina;
- Flores hermafroditas que surgen de una areola (generalmente de las superiores);
- Ovario ínfero con numerosos óvulos, rodeado de un pericarpelo con areolas con numerosas glóquidas y algunas espinas.

4.3 Los genotipos de nopal más conocidos

La recolección sistemática y continua de nopales ayudó a algunas plantas de *Opuntia* a desarrollar características excepcionales como diferentes grados de tolerancia, y las plantas se llevaron al hogar para promover su cultivo. Debido a su amplia utilización, algunas especies como *O. ficus indica*, *O. albicarpa* y *O. megacantha* se han domesticado. La mayoría de las especies han sido cultivadas para el consumo de sus frutas o cladodios. Sin embargo, algunas especies, como *O. streptacantha*, aún se encuentran en su estado silvestre y tienen una amplia distribución, lo que posiblemente explica su gran diversidad morfológica. Por lo tanto, es posible que la selección de la planta comenzó con *O. streptacantha* y luego se extendió a poblaciones de especies más cercanas, como *O. hyptiacantha* y *O. megacantha*. Finalmente, se concentró en variantes con frutos grandes, asociadas ancestralmente con *O. albicarpa* y con *O. ficus-indica*. Al menos una especie de *Opuntia* domesticada en México es conocida: Las 18 variedades de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., incluyendo *Opuntia albicarpa*, *Opuntia atropes*, *Opuntia cochineria*, *O. chavena*, *O. fuliginosa*, *O. guilanchi*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. lasiacantha*, *O. leucotricha*, *O. matudae*, *O. megacantha*, *O. pachona*, *O. robusta*, *O. streptacantha*, *O. tomentosa*, *O. undulata* y La forma sin espinas de *O. ficus-indica* es el resultado de un largo proceso de selección y cultivo que no existe en las nopaleras silvestres. Por lo tanto, se cree que ciertas especies, como *Opuntia megacantha* y *Opuntia streptacantha*, son la forma silvestre de esta especie. (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021).

4.4 Claves de la UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones)

El objetivo de estas claves es orientar de manera práctica y detallada para la distinción y homogeneidad y estabilidad de las diferentes especies de *Opuntia* (nopales tuneros y xoconostles) que existen. Pero de manera particular sirven para identificar caracteres que son apropiados para el examen (DHE) los cuales producen descripciones armonizadas de ciertas variedades. Para poder comprender estas claves se deben leer en conjunción con la Introducción General y sus documentos TGP conexos (UPOV., 2006).

Objeto de estas directrices de examen

Las presentes Directrices de Examen se aplican a todas las variedades de los siguientes grupos o especies *Opuntia* (*Cactaceae*):

Grupo 1: Chumbera, nopal tunero, tuna

Opuntia amyclaea Tenore, *O. ficus-indica* (L.) Mill., *O. streptacantha* Lemaire, *O. megacantha* Salm-Dyck, *O. duranguensis* Britton et Rose, *O. lasyacantha* Pfeiffer, *O. robusta* Wendland, *O. hyptiacantha* Weber

Grupo 2: Xoconostles

Opuntia joconostle Weber, *O. Matudae* Sheinvar, *O. Oligacantha* Sheinvar, *O. leucotrica* DC, *O. heliabravoana* Sheinvar, *O. spinulifera* Sheinvar.

Los caracteres de agrupamiento ayudan en la selección de las variedades que son más comúnmente conocidas que se cultivan en el ensayo con otras variedades que se desean conocer o identificar, de tal manera que estas variedades se puedan dividir en grupos para facilitar la evaluación y distinción de los diferentes grupos. Cuando hablamos de caracteres de agrupamiento nos referimos a todas esas características o niveles de expresión que ya se encuentran documentados en diferentes zonas geográficas y con diferentes condiciones climáticas pero pueden utilizarse de manera individual o en combinación con otros caracteres similares, por ejemplo: para seleccionar las variedades notoriamente conocidas que puedan ser excluidas del ensayo en cultivo utilizado para el examen de la distinción y para organizar el ensayo en cultivo de manera tal que variedades similares queden agrupadas conjuntamente (UPOV., 2006).

A. Material vegetal necesario

A.1 Existen autoridades especiales quienes se encargan de decidir dónde, cuándo, cuánto y la calidad que debe tener el material vegetal que se analizará. La persona que solicite este servicio debe especificar la procedencia del material, si se trata de otro país es necesario que se presenten todas las formalidades aduaneras y fitosanitarias.

A.2 El material deben ser plantas de tres años de edad o en casos especiales la autoridad definirá.

A.3 La cantidad mínima de material vegetal que se debe entregar debe ser de: 5 plantas de 3 años o, en la medida en que lo admitan las autoridades, 7 ramas que incluyan 3 cladodios sucesivos que sean suficientes para producir 5 plantas.

A.4 El material vegetal debe contar con sanidad tanto en apariencia física como genética, no debe carecer de vigor ni presentar algún tipo de plagas y enfermedades de importancia económica.

A.5 Este material no debe haber estado expuesto a algún tipo de tratamiento que afecte la expresión de los caracteres de la variedad.

B. Método de examen

B.1 *Número de ciclos de cultivo*

La duración mínima admisible para la realización de los ensayos es por lo regular de 2 ciclos de cultivo trabajados de manera independiente.

B.2 *Lugar de ejecución de los ensayos*

Normalmente los ensayos deberán efectuarse en un sólo lugar. Existe un documento (TGP/9 “Examen de la distinción”) el cual ofrece orientación respecto a los ensayos realizados en más de un lugar.

B.3 *Condiciones para efectuar el examen*

Los ensayos se deben realizar en condiciones específicas que aseguren un desarrollo óptimo y satisfactorio para que las características se expresen de acuerdo a la variedad que se está trabajando y que se produzca de esta manera una cosecha satisfactoria de frutos ambos ciclos.

B.4 *Diseño de los ensayos*

B.4.1 Cada ensayo deberá tener por finalidad la obtención de al menos 5 plantas.

B.4.2 Cada ensayo debe considerarse de una manera tal que permita que se realice la extracción de plantas o en su caso partes de ellas para realizar mediciones y conteos, sin perjudicar las observaciones ulteriores que deberán realizarse al finalizar el ciclo.

B.5 *Número de plantas/partes de plantas que se han de examinar*

Salvo indicación en contrario, todas las observaciones deberán efectuarse en 5 plantas o partes de cada una de las 5 plantas. En el caso de partes de plantas, el número que habrá de tomar de cada una de las plantas será de 2. En el caso de los caracteres frutales, las observaciones se efectuarán en 20 frutos.

B.6 *Ensayos adicionales*

Se podrán efectuar ensayos adicionales para estudiar caracteres pertinentes.

C. Evaluación de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad

C.1 Distinción

C.1.1 Recomendaciones generales

Es importante destacar la importancia de consultar la Introducción General de estas directrices antes de realizar algún examen y tomar decisiones. A continuación, se mencionan algunas características importantes que se deben tener en cuenta en estas directrices.

C.1.2 Diferencias consistentes

Al momento de observar las variedades las diferencias pueden ser muy evidentes, tanto que no sea necesario realizar otro ciclo de cultivo. Al igual, que en algunas circunstancias las condiciones climáticas no influyen de manera importante como para requerir que se repita un nuevo ciclo. Aunque, una manera de garantizar que una diferencia en un carácter, observada en un ensayo en cultivo, sea lo suficientemente consistente es examinar el carácter en al menos dos ciclos de cultivo independientes (UPOV., 2006).

C.1.3 Diferencias claras

Definir una verdadera diferencia entre dos variedades depende de varios factores que además tendrían que considerar, particularmente, el tipo de expresión del carácter que se analizará, es decir si se expresa de manera cualitativa, cuantitativa o pseudocualitativa. Además, es importante seguir recalando la importancia de que el usuario que realice esta investigación debe estar familiarizado con las recomendaciones que marca la Introducción General antes de tomar cualquier tipo de decisión (UPOV., 2006).

C.2 Homogeneidad

C.2.1 Los usuarios de estas pautas de examen deben leer la Introducción General antes de tomar decisiones sobre la homogeneidad. Sin embargo, estos son algunos de los factores que deben tenerse en cuenta en las pautas de examen.

C.2.2 Para evaluar la homogeneidad, se debe usar una población estándar del 1 % y una probabilidad de aceptación como mínimo del 95 %. No se permitirán plantas fuera de tipo en un tamaño de muestra de 5 plantas.

C.3 Estabilidad

C.3.1 En la práctica, los exámenes de estabilidad no suelen dar resultados tan confiables como los de los exámenes de homogeneidad y distinción. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que, en muchos tipos de variedades, una variedad homogénea también puede considerarse estable.

C.3.2 En caso de duda, la estabilidad se puede verificar cultivando una generación adicional o examinando un nuevo lote de semillas o plantas para asegurarse de que tenga las mismas características que el material proporcionado anteriormente.

D. Modo de agrupar las variedades y organización de los ensayos en cultivo

D.1 Los caracteres de agrupamiento ayudan a seleccionar las variedades bien conocidas que se cultivarán con las variedades candidatas en el ensayo, así como a dividir estas variedades en grupos para facilitar la evaluación de la distinción.

Los caracteres que contengan la siguiente clave en la segunda columna del Cuadro 3 de caracteres deberán examinarse como se indica a continuación:

(a) Cladodios: Salvo indicación en contrario, todas las observaciones de los cladodios se efectuarán en cladodios maduros, de uno a dos años de edad.

(b) Areolas, espinas y gloquideas: Salvo indicación en contrario, todas las observaciones de las areolas, espinas y gloquideas se efectuarán en cladodios intactos o frutos intactos, según proceda.

(c) Flor: Salvo indicación en contrario, todas las observaciones de la flor se efectuarán en el momento álgido de la floración. Todas las observaciones en la flor se efectuarán el día en que se abra la flor.

(d) Fruto: Todas las observaciones del fruto se efectuarán en 20 frutos intactos completamente maduros para el consumo.

(e) Diámetro del fruto/espesor de la cáscara/acidez/contenido de sólidos solubles: Las observaciones del diámetro del fruto, espesor de la cáscara, acidez y contenido de sólidos solubles se efectuarán en el centro del fruto. En lo que respecta al contenido de sólidos solubles, para la observación en el centro de fruto se recurrirá a un refractómetro.

Cuadro 3. Caracteres y su expresión según las distintas variedades de *Opuntia*.

Carácter	Variedades ejemplo
Planta: Porte. Erguido, Extendido, Decumbente o Colgante.	Cardón, Chapeada, Cristalina, Pabellón, Rojo Pelón, Sanjuanera.
Planta: Altura. Baja, Media o Alta.	Pico Chulo, Torreoja, Esmeralda, Rojo Vigor, Oreja de Elefante.
Planta: Achura Estrecha, Media o Ancha.	Copena F-1, Rojo Lirio, Cristalina, Esmeralda, Montesa, Reyna.
Cladodio: Longitud. Corta, Media o Largo.	Pico Chulo, Sanjuanera, Tapón de Mayo, Rojo Pelón, Tapón Aguanoso, Cristalina, Sangre de Toro.

Cladodio: Anchura.
Estrecho, Medio o Ancho.

Cladodio: Anchura.
Pequeña, Medio o Grande.

Cladodio: Anchura.
Elíptico estrecho, E. medio, E. ancho,
Circular, Rómbico, Oboval estrecho
Oboval ancho.

Cladodio: Grosor.
Delgado, Medio o Grueso.

Cladodio: Color.
Verde amarillento, Verde claro, Verde
medio, Verde oscuro o verde azulado.

Cladodio: Cerosidad.
Muy débil, Débil, Media o Fuerte.

Cladodio: Pubescencia de la
superficie.
Ausente o Presente.

Cladodio: Número de aréolas en la
hilera central.
Bajo, Medio o Alto.

Cladodio: Color de las aréolas.
Gris, Marrón amarillento o Marrón
negro.

Cladodio: Número de espinas por
aréola.
Ninguna o muy bajo, Bajo, Medio
Alto o muy alto.

Flor: Longitud.
Corta, Media o Larga.

Fruto: Longitud.
Corto, Medio o Larga.

Fruto: Color de la pulpa.
Verde claro, V. medio, Amarillo,
Anaranjado, Rosa, Rojo o Púrpura.

Semilla: Tamaño
Pequeño, Medio o Grande.

Fruto: Acidez.
Baja, Media y Alta.

Pico Chulo, Rojo Lirio, Milpa Alta, Cristalina, Oreja
de Elefante.

Oreja de Elefante, Rojo Pelón, Miquihuana,
Villanueva, Copena T-3, Reyna.

Copena F-1, Tlaconopal, Ixtapa, Milpa Alta, Tapón
Aguanoso, Atlixco, Trompa de Cochino, Rubí Reyna,
Fafayucan.

Burrona, Copena T2, Montesa, Memelo, Pico Chulo,
Rubí Reyna.

Cristalina, Reyna, Rojo Pelón, Milpa Alta, Blanca
Pepina
Morado Jalpa, Roja San Martín, Tapón de Mayo.

Tlaconopal, Copena T 5, Cristalina, Copo de Nieve.

Milpa Alta, Cuaresmeño, Valterrilla.

Cristalina, Pico Chulo, Tapón de Mayo, Amarillo
Plátano, Copena T-2, Rubí Reyna, Villanueva, Rojo
San Juan.

Milpa Alta, Reyna, Burrona, Chaveña, Cardón.

Pabellón, Rojo Pelón, Rojo Vigor, Rojo Lirio, Rojo
San Martín, Cristalina, Esmeralda, Torreoja,
Sanjuanera, Villanueva, Reyna.

Copena Z-1, Pico Chulo, Burrona, Colorada, Mango,
Sanjuanera.

Amarilla Santa Inés, Sangre de Toro, Fafayuca, Reyna,
Burrona, Cristalina.

Cristalina, Esmeralda, Reyna, Burrona, Montesa, Pico
Chulo, Meloncillo Rosa, Memelo, Rojo Pelón, Rubí
Reyna, Liria, Morada Jalpa, Roja San Martín

Cardón, Cascarona, Curesmeño, Pico Chulo, Reyna,
Blanca San José, Burrona, Chapeada

Blanca Larga, Fafayuca, Blanca de Castilla

Época de comienzo de la floración.
Temprana, Media o Tardía.

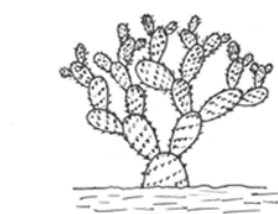
Sanjuanera, Tapón Aguanoso, Pico Chulo, Reyna,
Rojo Pelón, Burrón, Charola

Tipo de floración.
Una floración o dos floraciones.

Cristalina, Reyna, Rojo Pelón, Cuaresmeño

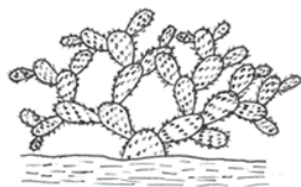
Explicaciones relativas a caracteres individuales

Ad. 1: Planta: porte



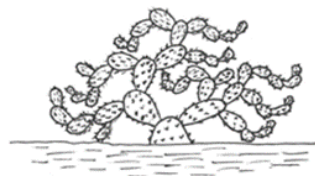
1

erecto



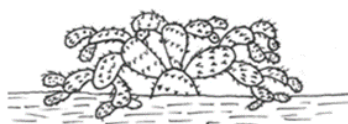
2

extendido



3

decumbente

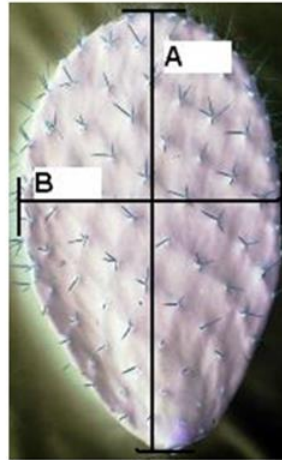


4

colgante

Ad. 4: Cladodio: longitud

Ad. 5: Cladodio: anchura



A= longitud

B= anchura

Ad. 7: Cladodio: forma



1

elíptica estrecha



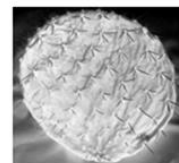
2

elíptica media



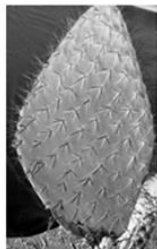
3

elíptica ancha



4

circular



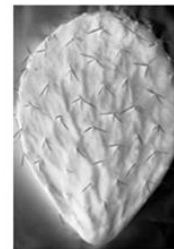
5

rómbica



6

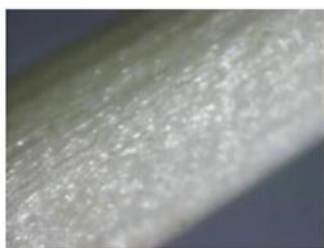
oboval estrecha



7

oboval ancha

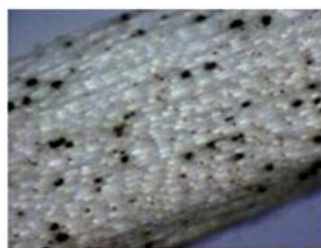
Ad. 19: Espina: superficie



1
lisa



2
acanalada



3
con púas

Ad. 20: Espina central: porte



1
erecto

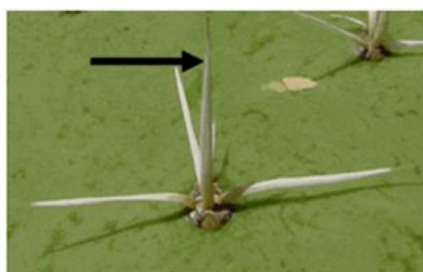


3
semierecto

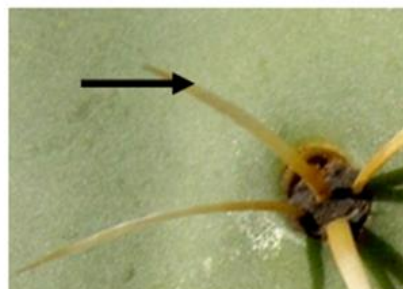


5
horizontal

Ad. 22: Espina central: curvatura (excluida la base)



1
ausente



9
presente

Ad. 23: Espina central: torsión



1
ausente



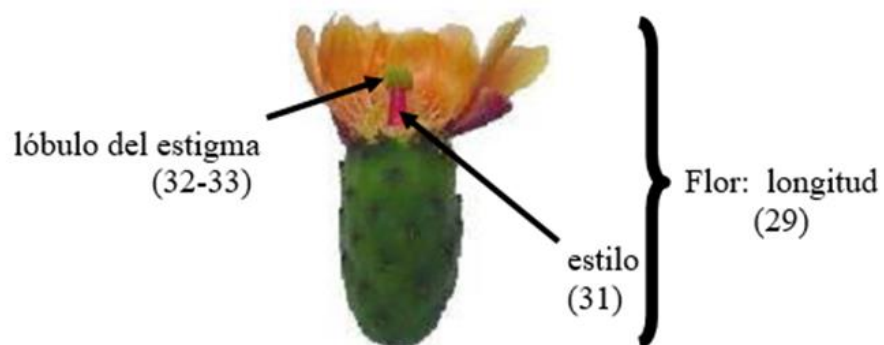
9
presente

Ad. 29: Flor: longitud

Ad. 31: Flor: color del estilo

Ad. 32: Flor: número de lóbulos del estigma

Ad. 33: Flor: color del lóbulo del estigma



Ad. 37: Fruto: forma en sección longitudinal



1
oblonga



2
elíptica estrecha



3
elíptico media



4
circular

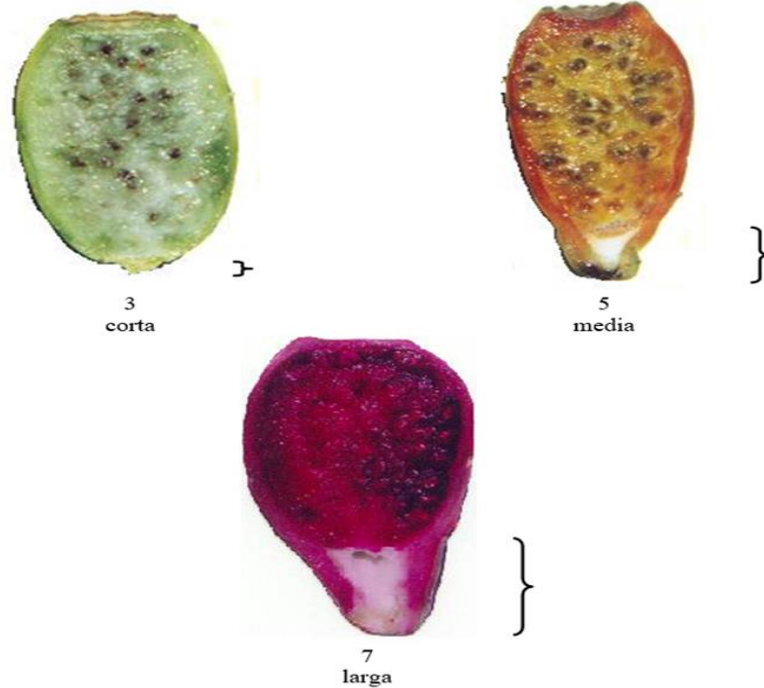


5
achatada

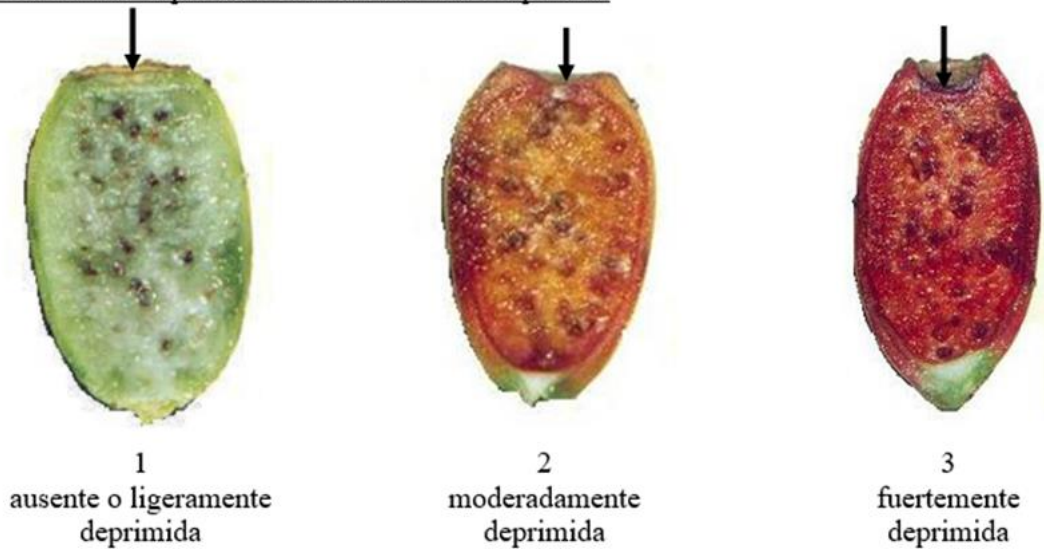


6
oboval

Ad. 41: Fruto: longitud del pedúnculo



Ad. 42: Fruto: depresión de la cicatriz del receptáculo



4.5 Número de cromosomas

La determinación del número cromosómico y el nivel de ploidía son muy útiles en la taxonomía de plantas. El número cromosómico básico de las *Opuntias* en la familia *Cactáceae* es $n=11$, y el número en las células somáticas es principalmente $2n=22$. En la subfamilia *Opuntioidea*, el 64.3% de los taxones son poliploides (Pinkava *et al.*, 1985),

varios estudios cariotípicos han mostrado parientes putativos de *O. Ficus-indica* con tetra, hexa u octoploide, en los parientes putativos de *O. ficus-indica* (Pinkava *et al.*, 1973).

Genotipo	Número de cromosomas
<i>O. megacantha</i> (Espinosa)	n=44
<i>O. streptacantha</i>	n= 44
<i>O. amychlaea</i> y <i>O. megacantha</i>	2n=88
<i>O. polyacantha</i>	2n=44
Para otros taxa de las series <i>Streptacanthae</i>	2n=88

4.6 Forma de las semillas

Una forma de caracterizar las especies de *Opuntia* es también a través de las características de sus semillas (Figura 1) y por medio de microfotografías de algunas de sus estructuras más pequeñas como estomas, polen, espinas, etc., (Figura 2) por lo que es importante tener en cuenta su forma tanto interna como externa.

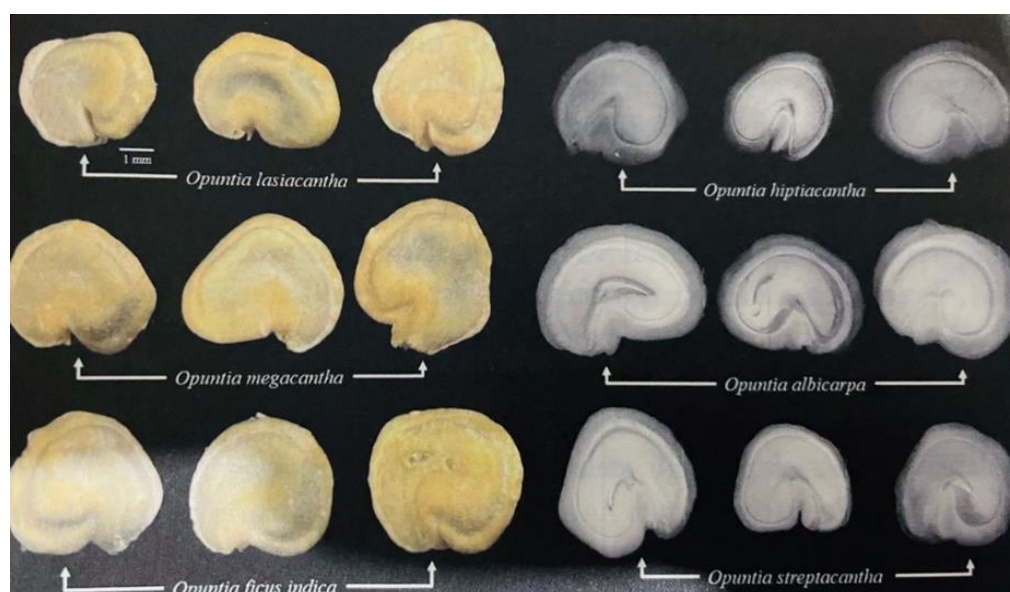


Figura 1. Diversidad morfológica de semillas del género *Opuntia*. Caracterización estereoscópica y mediante Rayos X.

4.7 Microfotografías de espinas y epidermis

Esta técnica se utilizó para diferenciar especies mexicanas conocidas, productoras de xoconostles, y en especial con *O. matudae* Scheinvar. Resulta diferente micro-morfológicamente de *O. matudae* por los caracteres de las células epidérmicas lignificadas de la parte apical (Figuras 2) y media de la espina, que son una de las estructuras botánicas más distintivas de las cactáceas así como en la forma de los tricomas y las células de la epidermis observando que estos atributos se mantienen constantes. La distribución de *O. matudae* subsp. *matudae* incluye a territorios de los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Estado de México, Hidalgo, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas, en tanto que la distribución de la nueva subsp. *purpurea* se restringe a Sain Alto, Zacatecas. Adicionalmente, para fines de certificación de semillas, la variedad de xoconostle 'Sainero' cuenta con el registro definitivo Núm. XOC-023-031111 y Núm. de expediente 2097 del Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas, manteniéndose bajo resguardo en el Depositario Nacional de *Opuntia* con la clave: O-367.

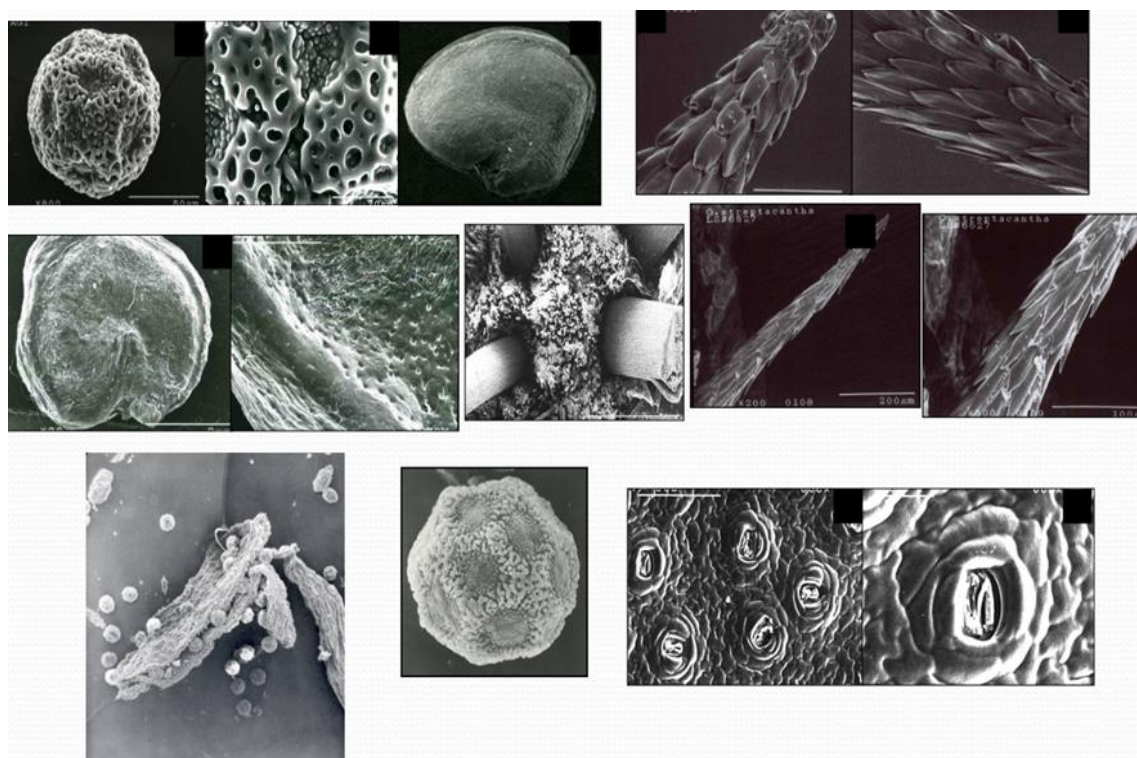


Figura 2. Microfotografías de espinas, granos de polen, epidermis, estomas, semillas etc. Que permiten una mayor diferenciación entre especies.

4.8 Aplicación de herramientas moleculares

En lo que respecta a los análisis de diversidad genética en poblaciones manejadas y cultivadas ex situ del género *Opuntia*, en general se ha encontrado que su grado de diversidad es similar entre sí. Sin embargo, en las poblaciones silvestres o manejadas in situ la variación genética es mayor, lo que indica que la selección fenotípica que se lleva a cabo está reduciendo la diversidad, aunque el efecto de domesticación sobre la estructura genética de las poblaciones aún es incipiente y no se conoce hasta qué nivel este proceso de domesticación y selección altera la diversidad genética.

La clasificación de la diversidad genética del género *Opuntia* con descriptores morfológicos se complica por la diversidad de especies y ecotipos, producto de procesos de hibridación natural debido a su propagación sexual y asexual, que permite gran cantidad de variantes. Así como por su plasticidad morfológica, resultado de la constitución genética e interacción con el ambiente. El uso de los métodos de clasificación comunes genera numerosas sinonimias; además, los problemas se acentúan por las descripciones que se realizan con ejemplares únicos de jardines y herbarios, de tal forma que la variabilidad natural de las poblaciones respectivas se ha excluido, a pesar de que es fundamental para la descripción apropiada de las especies y conformación de grupos.

Se han realizado diversos estudios para conocer la biodiversidad del nopal. Por ejemplo, en morfología, algunos autores propusieron la existencia de 93 especies para el subgénero *Opuntia* y otras 10 especies para el subgénero *Nopalea*. Reyes Agüero *et al.*, con base en la morfología de la planta, cladodio, flor, fruto y semilla, lograron identificar y registrar diferentes especies (*O. albicarpa*, *O. chaveña*, *O. durangensis*, *O. ficus-indica*, *O. hyptiacantha*, *O. joconostle*, *O. lasiacantha*, *O. lindheimeri*, *O. megacantha*, *O. robusta* y *O. streptacantha*).

Cuadro 2. Investigaciones sobre caracterización genética de diferentes especies de nopal a través de los años.

AÑO	AUTOR	INVESTIGACIÓN
1998	Wang <i>et al.</i>	RAPDs diferencia entre <i>O. ficus-indica</i> , <i>O. hyptiacantha</i> , <i>O. cochiniifera</i> , <i>O. lind-heimeri</i> var. <i>Inermis</i> y <i>O. ellisinana</i>
2003	Massimo Labra <i>et al.</i>	Por medio de la técnica de AFLPs y chSSR encontraron similitud entre especies distintas, y propusieron que <i>O. ficus-indica</i> debería ser considerada como una planta domesticada a partir de <i>O. megacantha</i> .

2006	García-Zambrano <i>et al.</i>	Separaron dos grupos de 100 genotipos sin encontrar una clara relación en cuanto a la caracterización taxonómica conocida.
2007	Luna-Paez <i>et al.</i>	Usando una combinación entre RAPDs e ISSR en embriones apomícticos de 22 genotipos silvestres y cultivados encontraron alta relación entre genotipos de <i>O. ficus indica</i> y <i>O. megacantha</i> con los de <i>O. streptacantha</i> .
2014	Espinoza-Sanchez <i>et al.</i>	Se analizaron 85 genotipos representativos de <i>Opuntia</i> (silvestres y cultivados) por medio de la técnica de AFLPs con los iniciadores Mse I-CAC/Eco RI-AAG.
2017	Pacheco-Aguilar <i>et al.</i>	Caracterizaron genéticamente un grupo de 41 genotipos utilizando 26 microsatélites por PCR.
2023	Modise T. J <i>et al.</i>	Analizaron la diversidad genética de los cactus (<i>Opuntia</i> spp.) sudafricanos utilizando marcadores basados en secuencias simples de repetición (SSR).

4.9 Perspectivas

Actualmente también se han realizado investigaciones en las que se incluyen análisis mediante la aplicación de marcadores moleculares para establecer diferencias entre *O. ficus-indica*, *O. hyptiacantha*, *O. cochinifera*, *O. lindheimeri* y *O. ellisinana*; el uso de marcadores moleculares permite clasificar grupos de genotipos sin encontrar una clara relación en cuanto a caracterización taxonómica conocida (Cuadro 2).

Al utilizar marcadores moleculares como isoenzimas, cpSSR, ISSR, AFLP y análisis filogenético Bayesiano de nrITS de secuencias de ADN, otras investigaciones han definido e identificado variedades de *Opuntia spp.* y otras cactáceas. Se han propuesto marcadores moleculares basados en la amplificación de secuencias de genoma específico como herramientas directas y efectivas para estimar las relaciones intergenéricas e interespecíficas entre los diversos taxones. En este sentido, el análisis de caracteres para la clasificación de plantas avanza y se profundiza gradualmente en diversos campos del conocimiento, como el anatómico, morfológico, genético (citogenético) y bioquímico

VI. Literatura citada

- Aguilar, C. N., Rodríguez, H. R., Saucedo P. S. y Jasso C. D. 2008. Fitoquímicos sobresalientes del semidesierto Mexicano: de la planta a los químicos naturales y a la biotecnología. Ed. Path Design Saltillo, Coahuila, México. 579 p.
- Anderson, E.F. 2001. The Cactus Family.
- Anaya-Pérez, M. A. 2001. History of the use of *Opuntia* as forage in México. In: Mondragón-Jacobo, C.; Pérez González, S. (Eds.) Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. FAO Plant Production and Protection Paper No. 169. Roma, Italia. 5-12 pp.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) 2021. Biodiversidad Mexicana: Nopales.
- Cruz-Cárdenas, C. I., Sandoval-Cancino G., Gallegos-Vázquez C., Bojórquez-Quintal J. E. 2021. Innovar desde la tradición. Segunda parte. Origen y diversidad genética de *Opuntia ficus-indica*.
- Flores, A., Rodríguez, G. F., Murillo B., Trejo, R., Arreola, J. G. 2006. Evaluación preliminar de la reserva de nopal (*Opuntia* spp) en la región Laguna-Chihuahua. Universidad Autónoma Chapingo.
- Gallegos, C., J. Cervantes y A. F. Barrientos. 2005. Manual gráfico para la descripción varietal del nopal tunero y xoconostle (*Opuntia* spp.). SNICS-SAGARPA / Universidad Autónoma Chapingo, 116 pp.
- Guzmán, U., S. Arias y P. Dávila. 2003. Catálogo de cactáceas mexicanas. UNAM /Conabio, México, 315 pp.
- Mondragón-Jacobo, C., Nefzaou A. y Sáenz C. 2018. ECOLOGIA DEL CULTIVO, MANEJO Y USOS DEL NOPAL.
- Pinkava, D. J., Baker M. A., Parfitt B. D., Mohlenbrock M.W. y Worthington, R. D. 1985. Chromosome numbers in some cacti of North America V. Syst. Bot., 10: 471–483.
- Scheinvar L., Gallegos-Vázquez C., Gámez-Tamariz N., Olalde-Parra G., 2020. Atlas de los nopales silvestres.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). 2020. Crece en México el consumo y producción de nopal: Agricultura.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2017. Nopal, planta que documenta la historia de México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2020. Consumo y producción de nopal en México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV). 2006. Directrices para la ejecución del examen de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad.

2. DEPOSITARIO NACIONAL DE OPUNTIA: VÍNCULO PARA EL DESARROLLO E INNOVACIÓN EN NOPAL EN MÉXICO.

Clemente Gallegos-Vázquez¹ y Nicolás A. Gallegos Luevano²

¹Curador del Depositario Nacional de Opuntia y Profesor-Investigador del Centro Regional Universitario Centro Norte, Universidad Autónoma Chapingo, Calle Cruz del Sur N° 100, Col. Constelación. El Orito, Zacatecas, Zac. C.P 980.

²Técnico Medio Especializado, Agropecuario, Silvícola del Centro Regional Universitario Centro Norte, Universidad Autónoma Chapingo.

Correspondencia:CGV, ORCID:0000-0003-2506-8274, cgallegosvazquez@gmail.com

Tema	Página
I. Resumen.	58
II. Introducción.	59
III. Antecedentes.	60
3.1 El recurso fitogenético de <i>opuntia</i> .	60
3.2 El pasado en relación a su aprovechamiento.	61
3.3 Perspectiva de su aprovechamiento.	62
IV. Creación del Depositario Nacional de <i>Opuntia</i> .	65
4.1 Acuerdos institucionales y colecta de genotipos.	65
V. La importancia del registro de las variedades de uso común mexicanas.	67
VI. Germoplasma nativo para mejorar la producción de tuna en México.	70
6.1 Roja azteca (<i>opuntia megacantha</i> sal-dick).	70
6.2 Amarilla plátano (<i>opuntia megacantha</i> sal-dick).	70
6.3 Amarilla jarro (<i>opuntia megacantha</i> sal-dick).	71
6.4 Venustiana (<i>opuntia megacantha</i> sal-dick).	71
6.5 Roja sandía (<i>opuntia megacantha</i> sal-dick).	71
6.6 Blanca san José (<i>opuntia albicarpa</i> scheinvar).	71
VII. Literatura citada.	73

I. RESUMEN

Atendiendo el escenario de destrucción acelerada e irreversible de las nopaleras silvestres, así como la pérdida de las plantaciones de solar, en 1987 se iniciaron las acciones para el establecimiento de una colección de nopal a partir de materiales recolectados en los solares, así como la introducción de variedades comerciales de la región centro norte de México, postulándose como objetivo general de “Crear un banco de germoplasma de nopal en donde se concentren variantes o ecotipos de interés, mediano o inmediato, a los programas de investigación agronómica, botánica, genética, etc.” Ante la situación, investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo, INIFAP, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el CBTA 138 de Villa Hidalgo Zac., y del Instituto de Biología de la UNAM propusieron el proyecto Caracterización morfológica de las principales selecciones o cultivares comerciales de tuna y nopal mexicanos”. Los resultados de esta iniciativa se tradujeron en la descripción varietal de 95 cultivares, de los cuales 30 fueron Inscritas en el 2004 con registro definitivo

en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV-SNICS), 20 en el 2009, 20 en el 2011 y los 25 restantes entre 2015 y 2017. Este es un gran aporte para promover la conservación y dar el valor que se merece la especie de nopal originario de México.

II. INTRODUCCIÓN

México ha sido señalado reiteradamente como un país megadiverso en cuanto a recursos florísticos. Los botánicos mexicanos han calculado que sobre el territorio nacional vegetan entre 25 000 y 35 000 especies de plantas vasculares. De acuerdo con Rzedowski (1978), México tiene algunos tipos de vegetación únicos en su género, considerados como autóctonos, que, de acuerdo a datos de la CONABIO, albergan cerca de 9,500 especies endémicas, siendo la familia de las cactáceas uno de los casos más conspicuos de tal endemismo. Las cactáceas son un grupo que bien representa esa cualidad, pues de acuerdo a Bravo y Scheinvar (1999), esta familia comprende aproximadamente 2000 especies. Inglese *et al.* (2018) indicaron que las cactáceas están siendo de creciente interés alrededor del mundo en particular el nopal (*Opuntia* spp.) debido a sus características únicas, las cuales le proveen resiliencia a las condiciones limitantes, dentro de las que destacan la sequía, altas temperaturas y suelos pobres.

De la misma forma, la riqueza cultural de México cobra gran relevancia por su profunda contribución a la creación, conservación y depuración de una gran cantidad de recursos fitogenéticos de los que hoy goza la humanidad (Cuevas, 2002). En la actualidad, la pérdida acelerada de la diversidad genética vegetal tanto en materiales silvestres como domesticados, constituye un problema que requiere de atención inmediata que pone en evidencia la urgente necesidad de conservarlos y usarlos de manera sostenible (Gallegos, 2007).

Los recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura (RFAA) constituyen la base biológica de la seguridad alimentaria mundial que, directa o indirectamente, contribuyen al sustento de la humanidad (Esquinas, 2003). Los RFAA están constituidos por la diversidad del material genético que contienen las variedades tradicionales y los cultivares modernos, así como sus parientes silvestres y otras especies de plantas silvestres utilizadas para obtener alimentos (FAO, 1996). Asimismo, estos recursos constituyen una fuente de variabilidad genética a partir de la cual es posible obtener nuevas variedades, con el uso de técnicas tradicionales y modernas de mejoramiento genético (Gallegos, 2007).

En consecuencia, el conocimiento, evaluación y preservación de la variabilidad genética de las especies, es una actividad estratégica que debe ser incluida en los planes de desarrollo agrícola, ya que representan un recurso natural en riesgo continuo (Gallegos y Barrientos, 2009). En los casos de las especies vegetales de las cuales México es el centro de origen, como el caso del nopal, estas actividades requieren atención especial.

Atendiendo lo anterior, el gobierno de México diseñó y emprendió diversas acciones, en el marco del Plan de Acción Nacional, sobre el conocimiento, evaluación y preservación de la variabilidad genética de las especies, a través del Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura (SINAREFI) como instancia de coordinación nacional, operando mediante redes por especie o temáticas como estructuras organizativas de vinculación y desarrollo que promueven y fomentan la integración de actividades y proyectos. En la actualidad estos esfuerzos se continúan bajo la coordinación del Subcomité de Recursos Genéticos Agrícolas, inscrito en el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

Como parte de los logros de la operación de la Red Nopal, y como resultado de la exploración sistemática y colecta de material genético realizadas de 1989 a 2017, se cuenta con un centro

de recursos genéticos de nopal, formalizado bajo convenio UACH-SAGARPA en el 2010, como el Depositario Nacional de *Opuntia*, postulando como su principal meta el salvaguardar la riqueza nacional de germoplasma de nopal y facilitar la utilización y potenciación del recurso

III. ANTECEDENTES Y PERSPECTIVAS DE APROVECHAMIENTO

3.1 El recurso fitogenético de *Opuntia*

Las cactáceas constituyen una familia botánica endémica del continente americano, que de acuerdo a Bravo y Sheinvar (1995) tuvo su origen en la costa atlántica de América, distribuyéndose desde Peace River al norte de Canadá (59° latitud norte) hasta la Patagonia en Argentina (52° latitud sur).

Según Parfitt y Gibson (2003), la familia de las cactáceas comprende cuatro subfamilias: Pereskioideae, Opuntioideae, Cactoideae y Maihuenioideae. Dentro de éstas, destaca la subfamilia Opuntioideae, ya que alberga a los nopales. El género *Opuntia*, *sensu stricto*, comprende a plantas con pseudotallos aplanados o cladodios, periantos cyatiformes y excepcionalmente tubulados, con estambres más cortos que los tépalos (Stuppy, 2002; Wallace and Dickie 2002), y comprende 191 especies (Anderson, 2001); aunque algunos otros autores (v.g. Hunt, 2002) estiman que este género contiene más de 215 especies. Al respecto, Scheinvar *et al.* (2020), resaltan que la clasificación de la familia de las Cactáceas ha tenido grandes cambios taxonómicos que obedecen a los diferentes criterios de los catálogos que han dedicado su esfuerzo a esta tarea, señalando que el gran problema es la enorme cantidad de sinónimos existentes.

En México, por nopales se identifica a plantas de la familia Cactaceae de los subgéneros *Opuntia* y *Nopalea*. Scheinvar *et al.* (2020) desarrollaron una exhaustiva investigación sobre los nopales silvestres mexicanos, reportado un inventario de 97 especies de *Opuntia* y 8 especies de *Nopalea*. A tal listado se debe añadir dos especies no consignadas en dicho inventario por tratarse de especies cultivadas y uso hortofrutícola: *O. ficus-indica* (L.) Mill. y *O. albicarpa* Sscheinvar.

Debido a esta riqueza de especies del género *Opuntia* con que cuenta, México es reconocido como centro de origen y centro de distribución primaria de las plantas de este género. Por otra parte, el uso del nopal en la alimentación humana, en México data de 7 a 9 mil años, según los hallazgos arqueológicos conducidos por R. S. Mc. Neish en las regiones semiáridas del SW de Tamaulipas y en el Valle de Tehuacán, Puebla (Heiser, 1981).

Además de las evidencias arqueológicas, las fuentes históricas disponibles indican que las grandes nopaleras fueron uno de los recursos naturales más trascendentes en los procesos de sedentarización del norte y centro de México. Por ejemplo, Crespo (1976), en su estudio sobre el área denominada “El Gran Tunal” (que va de Santa María del Río a Salinas, S. L. P.), encontró que el patrón de asentamiento general coincide con la zona de distribución de la Gran Nopalería.

En México los nopales tienen una amplia distribución, siendo el centro y norte del Altiplano, el noroeste, el Bajío, el Eje Neovolcánico y el valle de Tehuacán-Cuicatlán las regiones con mayor riqueza de especies, según lo establecen el Consejo Mexicano de Nopal y Tuna, La Red Nopal y la CONABIO (COMENTUNA-Red Nopal- CONABIO, 2008). En las regiones tropicales secas y los desiertos del norte hay menor riqueza, no obstante, suelen encontrarse especies endémicas de gran importancia. En este contexto, en el país destaca la región de la Altiplanicie Meridional del Desierto Chihuahuense con la mayor riqueza específica de *Opuntia* y mayor cantidad de especies endémicas (Reyes y Aguirre, 2006; Godínez y Ortega,

2007). El hábitat de la mayor parte de las especies silvestres de *Opuntia* son matorrales xerófilos; en algunos de estos matorrales, las especies de nopales son dominantes fisonómicos, y constituyen los matorrales crasicaules de *Opuntia* (Figura 1) o nopaleras (Rzedowski, 1978).



Figura 1. Relictos de nopaleras de *O. Streptacantha* y *O. leucotricha* en el suroeste de San Luis Potosí. (Fotografía: Cortesía de Roberto Garfías).

3.2 El pasado en relación a su aprovechamiento

El nopal (*Opuntia* spp.) es una planta que ha estado ligada íntimamente a la historia e identidad de los mexicanos; ha formado parte importante, no sólo del alimento de los pueblos del árido mexicano, sino del complejo cultural de dicha región (Bravo, 1978). El vínculo entre los mexicanos y el nopal es de origen; los primeros pobladores de las regiones que actualmente conforman México, desde su llegada a las zonas donde existía el nopal, encontraron en esta planta un recurso importante para su subsistencia, generando movimientos migratorios en temporadas de fructificación para aprovechar el fruto y otras partes de la planta como alimento (Powel, 1977). El nopal como medicina tenía aplicaciones desde el nacimiento, pues el mucílago mezclado con agua se daba a beber a la parturienta (Sahagún, 2001), o bien, la infusión de nopal se usaba para remediar los efectos alucinógenos de algunas plantas (Sodi, 1968).

Asimismo, al ser el nopal un forraje natural para animales silvestres también les aseguraba la caza, especialmente en épocas críticas originadas por efectos climatológicos adversos; con el tiempo le descubrieron propiedades terapéuticas y otras importantes utilidades para la forma de vida que llevaban, siendo factores definitivos para lo que podemos considerar la fase previa a la vida sedentaria (Powel, 1977). Con el tiempo, el conocimiento acumulado sobre las características y propiedades de algunas plantas, permitió el cultivo y domesticación de especies vegetales factor determinante para el desarrollo de los grupos humanos y posteriormente el desarrollo de las civilizaciones mesoamericanas.

En estos procesos el nopal fue una planta siempre importante, por lo que se convirtió en un producto de gran tradición y simbolismo. Así, se registran referencias al nopal en la mitología antigua y posteriormente en el jeroglífico de la gran Tenochtitlan (Bravo-Hollis, 1978); en nuestros días forma parte del escudo nacional mexicano, lo encontramos también en el de la Universidad Nacional Autónoma de México, como testimonio del importante y ancestral vínculo entre el pueblo mexicano y esta noble planta (Scheinvar *et al.*, 2020).

La historia da cuenta del nopal, en periodos posteriores, como una fuente de riqueza muy importante para esta nación. Los conquistadores españoles a su llegada encontraron un refinado conocimiento y tecnología para el consumo del nopal, así como para la producción y utilización, en el teñido de telas y otros materiales, de colorantes obtenidos a partir de la grana cochinilla (Reyes-Agüero, 2005), que se desarrolla en el nopal, producto que llegó a ocupar el tercer lugar, junto al oro y la plata, en las exportaciones de la Nueva España (actualmente México). En consecuencia, el nopal fue aceptado por los españoles de tal forma que su uso se afianzó en las poblaciones criollas y mestizas resultantes (Bye, 1979), en las que de acuerdo con Powel (1977), prevaleció el hábito de recolectar frutos (o tunas) y nopalitos en los grupos de colonizadores indígenas y españoles que sustituyeron a las tribus chichimecas al final del siglo XVI, así como en los actuales grupos mestizos a quienes dieron lugar y que han habitado estas zonas en los últimos 400 años (Aguirre-Rivera, 1983).

El nopal es una planta utilizada y consumida por los mexicanos desde tiempos inmemoriales. Se sabe de las poblaciones indígenas del Gran Tunal que tenían un uso muy refinado del nopal a través de la recolección; posteriormente surgieron los solares, considerados como la síntesis del esfuerzo de generaciones de recolectores por acopiar lo más útil de la diversidad genética del nopal en sus respectivos territorios de recolecta y de cientos de años de cuidados para preservarlos (Reyes, 2005). Sin embargo, de acuerdo con algunos especialistas, el proceso que dio origen a las plantaciones de solar comenzó a perderse en las últimas décadas, a la par de la destrucción acelerada e irreversible de las grandes nopaleras de donde se nutrían, como consecuencia de fenómenos como el avance de la frontera agrícola y urbana sobre tierras que antes constituían una reserva ecológica no oficial, por el sobrepastoreo y por la tendencia generalizada a la utilización de unos cuantos genotipos en la producción comercial (Gallegos y Barrientos, 2009).

Del proceso histórico brevemente reseñado, resulta evidente que en México existe una gran tradición y conocimiento sobre el nopal, especialmente en cuanto a usos y cultivares obtenidos mediante un trabajo permanente de selección, realizado a través de siglos, tanto en nopaleras naturales, como en huertos de solar o traspatio. En ese contexto se postula que los indígenas Otomíes han sido los principales domesticadores y dispersores de los cultivares de *Opuntia* a diversos lugares del Altiplano Meridional (Reyes-Agüero *et al.*, 2004, 2005a, 2005b).

3.3 Perspectivas de su aprovechamiento

Los antiguos mexicanos desarrollaron el cultivo del nopal aprovechando las poblaciones silvestres, el resultado es una planta de uso múltiple de la cual se aprovechan los nopalitos, las pencas maduras como forraje y la fruta. En el proceso de domesticación los huertos de

traspasos fueron un paso intermedio, de importancia actual en las zonas semiáridas donde ayudan a mitigar las necesidades de alimento de humanos y ganado (Loza, 2007).

Hasta hace unas décadas, la producción de las plantaciones de solar que suficiente para satisfacer el autoconsumo y la reducida demanda regional de tuna y nopalito (Figuerola *et al.*, 1980); sin embargo, después de los años cincuenta, esta demanda se convirtió en nacional, e incluso internacional (Flores y Gallegos, 1993), transitando hacia el desarrollo de plantaciones comerciales (Figura 2 y 3), modalidad de aprovechamiento que aumenta paulatinamente, pues la demanda sigue creciendo, pero también comienzan a presentarse los primeros problemas en el mercado exterior, como la falta de normalización de los productos y la imposibilidad de satisfacer ciertas demandas con los cultivares actualmente plantados (Gallegos y Mondragón, 2011).

En este contexto, (Gallegos y Mondragón, 2011) sostienen que la industrialización y sus efectos sobre la migración de la población mexicana hacia los grandes centros de población, empujó a los productores a desarrollar el cultivo formal del nopal en menos de 50 años, un caso quizá único en la agricultura mexicana y que en aspectos productivos hoy día se traduce en una amplia variedad de especies cultivadas, conocimiento sobre formas de uso, transformación y consumo, sistemas de producción y tecnologías (Gallegos y Mondragón, 2013a).

Actualmente, la producción de nopal y tuna en México es una actividad formal que reconoce al nopal como un cultivo valioso para zonas semiáridas, como recurrentemente se ha reportado durante las últimas cuatro décadas (Mondragón y Gallegos, 2013); para el caso de la tuna, ocupa el primer lugar mundial en superficie cultivada y volumen de producción, alcanzando las 55,000 ha y 428,763 t, respectivamente (SIAT, 2016) y consumo, además de tener la más amplia diversidad de especies endémicas y cultivares.

A la fecha, el nopal tunero se considera como un cultivo de contrastes, mientras por un lado existen regiones donde todavía se realiza cultivo extensivo de baja tecnología, en la mayoría de las zonas productoras es cada vez más común que se estén usando técnicas de producción típicas de frutales más desarrolladas y aún de las hortalizas, tales como la irrigación por goteo, la ferti-irrigación, el uso de nutrientes y pesticidas de origen orgánico (Gallegos y Mondragón, 2013b).

En síntesis, en México se ha incrementado notablemente el aprovechamiento de la producción que ofrecen las nopaleras silvestres, las de los huertos familiares, a través del desarrollo de las plantaciones comerciales especializadas, de las que dependen poco más de 50 mil familias de regiones en las que existen muy pocas opciones productivas (COMENTUNA, 2005).



Figura 2. Plantación comercial de tuna Var. Cristalina, *O. Albicarpa* (La Victoria, Pinos, Zac.). (Fotografía: Clemente Gallegos V.).



Figura 3. Plantación comercial de nopal verdura (nopalito) Var. Milpa Alta (Tlalnepantla, Mor.). (Fotografía: Clemente Gallegos V.).

IV. REACIÓN DEL DEPOSITARIO NACIONAL DE *OPUNTIA*

La idea de la creación y operación de un Banco o Depositario Nacional de Germoplasma de Nopal se consideró pertinente con base en los aspectos siguientes:

- México es centro de origen y centro primario de distribución del género *Opuntia*, concentrando la mayor riqueza de formas cultivadas de nopal.
- La cultura más desarrollada sobre las formas de manejo y uso del nopal para la alimentación del hombre corresponde a nuestro país.
- La multiplicidad actual y futura de usos de estas plantas, y
- El desarrollo previsible de la demanda de productos derivados del nopal, tanto para la alimentación como para el tratamiento de distintos padecimientos, que de manera creciente aquejan a la humanidad, justifican la creación de una instancia que resguarde, genere conocimiento, conserve y potencie el uso sustentable de este recurso fitogenético.
- El riesgo de pérdida de diversidad genética de nopal.

4.1 Acuerdos institucionales y colecta de genotipos

Atendiendo el escenario de destrucción acelerada e irreversible de las nopaleras silvestres, así como la pérdida de las plantaciones de solar, en 1987 se iniciaron las acciones para el establecimiento de una colección de nopal a partir de materiales recolectados en los solares, así como la introducción de variedades comerciales de la región centro norte de México, postulándose como objetivo general de “*Crear un banco de germoplasma de nopal en donde se concentren variantes o ecotipos de interés, mediato o inmediato, a los programas de investigación agronómica, botánica, genética, etc.*” (Gallegos *et al.*, 1994).

Los trabajos realizados en los 33 años de operación. Incluyendo las actividades de prospección y colecta, caracterización y resguardo de la colección fue posible a la concurrencia de recursos personales, institucionales (Instituto de Horticultura y Dirección General de Investigación y Postgrado) y de aquellos provenientes de la gestión ante instituciones nacionales

En una primera etapa de trabajos (1990-1995), se logró acopiar un acervo de 51 accesiones, sin apoyo financiero formal más que el tiempo laboral parcial del responsable de la iniciativa. Una segunda etapa (1998-2002) se desarrolló con el financiamiento de un proyecto interinstitucional UANL-UACH con financiamiento del CONACyT, pudiéndose incrementar el acervo a 252 accesiones. La tercera etapa (2003-2014), que fue la que potenció en definitiva la iniciativa de este proyecto, fue respaldada con el financiamiento del Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura (SINAREFI/SNICS/SAGARPA) lográndose incrementar el acervo genético a 410 accesiones documentadas como parte de la riqueza nacional de *Opuntia* (Figura 3). De tal acervo se perdieron 26 accesiones por efectos de bajas temperaturas extremas, quedando un listado final de 384 (Gallegos y Barrientos., 2009), constituyendo así la colección de *Opuntia* más importante a nivel mundial.

Con base en la información morfológica registrada, se procedió a identificar taxonómicamente a los cultivares; en los casos en donde fue imposible asignar un nombre científico, al menos se señaló la identidad más probable o su pertenencia a una de las series del género, según el sistema de Bravo (1978). Las especies mejor representadas fueron *O. ficus indica*, *O. megacantha* y *O. albicarpa* (Cuadro 1).

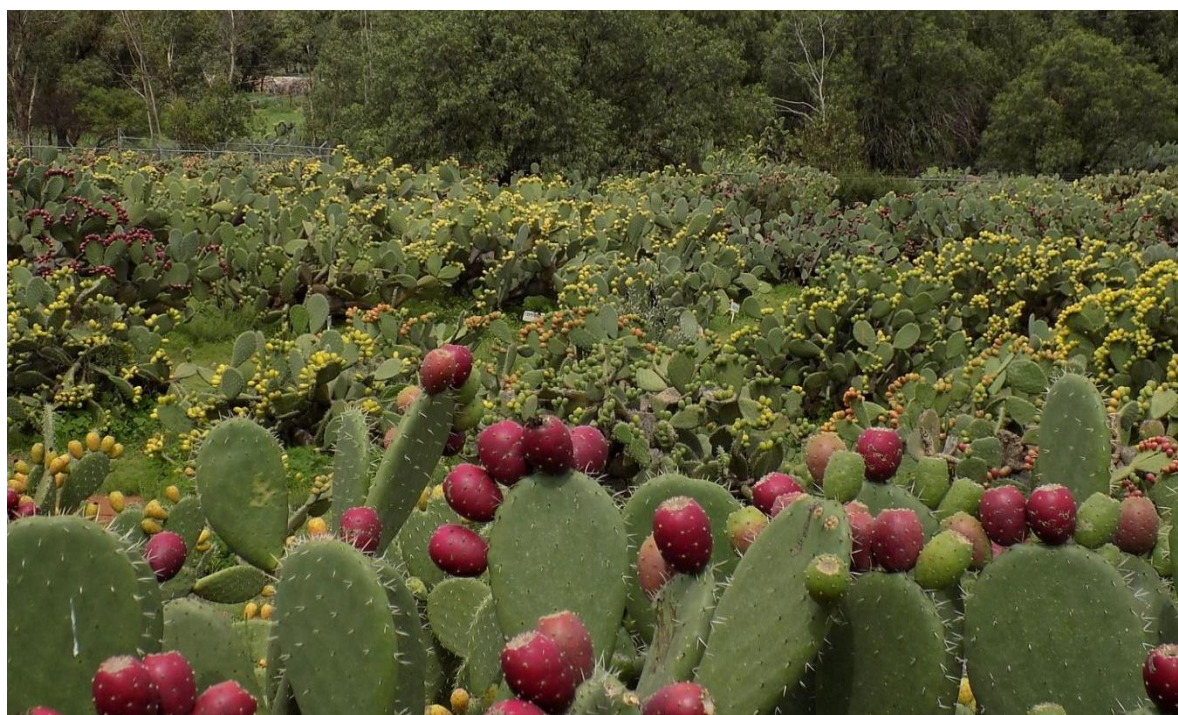


Figura 3. Aspecto general de la plantación donde se resguarda el acervo genético de nopal en el Depositario Nacional de *Opuntia*. El Orito, Zac. (2017) (Fotografía: Clemente Gallegos V.).

Cuadro 1. Principales especies de *Opuntia* preservadas en el Depositario Nacional de *Opuntia*.

Especie	Número de accesiones	Accesiones de mayor distribución
<i>O. ficus-indica</i> (L.) Mill.	82	Milpa Alta, Atlixco, Rojo Pelón, Goliat
<i>O. megacantha</i> Salm-Dyck	70	Montesa, Pico Chulo, Rosa de castilla, Rubí Reina
<i>O. albicarpa</i> Scheinvar	65	Reyna, Cristalina, Gavia, Fafayuca
<i>O. lasiacantha</i> Pfeiff.	15	Sanjuanero, Amarilla Apozol, Tuna rosa
<i>O. streptacantha</i> Lem.	14	Cardón, Naguilona, Cardón blanco,, Roja Sainera
<i>O. matudae</i> Scheinvar	12	X. cuaresmeño, X. Cuerón, X. Cuaresmeño Blanco
<i>O. robusta</i> H. L. Wendland ex Pfeiff.	11	Aguanoso, Mayero, Tapón Macho, Bonda
<i>O. joconostle</i> F.A.C. Weber in Diguett	9	Xoconostle Manzano, X. Blanco, X. Colorado
<i>O. oligacantha</i> Pfeiff. Ex Salm-Dyck	6	Xoconostle del Borrego, X. de castilla
<i>O. hyptiacantha</i> F.A.C. Weber	4	Charola, Memelo, Sanpedreño
<i>O. chavena</i> Griffiths	4	Cascarón, Chaveño, Blanca Cilindro, Nigrita
<i>O. duranguensis</i> Britton y Rose	3	Xoconostle cambray, X. de la virgen
<i>O. leucotricha</i> De Candolle	2	Nopal duraznillo
<i>O. incarnadilla</i> Griffiths	1	Encarnadilla
<i>O. cochinera</i> Griffiths	1	Cacalote
<i>O. Lindheimeri</i> Engelm.	1	Nopal coral
<i>O. undulata</i> Griffiths	1	Bolañera
<i>O. tezontepecana</i> Gallegos & Scheinvar *	1	Xoconostle de invierno
<i>O. galleguiana</i> Scheinvar & Olalde*	1	Xoconostle Sardo
<i>O. leiascheinvariana</i> Martínez & Gallegos*	1	Xoconostle Matizado
<i>O. delafluentiana</i> Martínez & Gallegos*	1	Xoconostle
Otras	13	
Sin identidad**	66	
Total	384	

*Nuevas especies publicadas como producto del proceso de evaluación del acervo genético

**Accesiones pendientes de identificar pues carecían de frutos o las plantas eran pequeñas o estaban enfermas

Por otro lado, reconociendo que la protección, conservación y, en su caso registro y protección del patrimonio genético de nopal mexicano de interés económico, representa uno de los elementos de importancia estratégica para lograr un desarrollo sostenido de la producción y el comercio de nopal verdura, tuna, xoconostle y sus derivados de nuestro país, en un contexto de apertura creciente de los mercados agropecuarios en el mundo, el Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Agricultura y la Alimentación (SINAREFI-SNICS-SAGARPA) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) convinieron en septiembre de 2010 la formalización de cambio de Banco de Germoplasma de Nopal (*Opuntia* spp.) del CRUCEN-UACH a la creación oficial del Depositario Nacional de Opuntia, con el propósito principal de permitir estructurar acciones de recolecta de materiales, caracterización y estudio, resguardo, registro-protección, multiplicación, utilización y potenciación de su uso en la alimentación y la agricultura del país (Gallegos y Barrientos, 2009), postulándose las siguientes metas:

- Salvaguardar la riqueza nacional de germoplasma de nopal
- Concentrar la diversidad de este grupo de plantas existente en el país y garantizar su conservación.
- Albergar y mantener en custodia los materiales registrados, así como los de referencia de la Guía UPOV y, en su caso, multiplicar algunos cultivares de interés
- Promover y realizar estudios y la caracterización de los distintos materiales.
- Facilitar la utilización y potenciación del recurso
- Apoyar la generación de tecnologías para la conservación y aprovechamiento sustentable de este recurso vegetal
- Brindar soporte técnico y científico a productores y empresas en diferendos comerciales relacionados con la propiedad, derechos y registro de los materiales.

Para lograr la conservación se requiere la combinación de diversas acciones y políticas orientadas a garantizar su continua existencia y disponibilidad, de manera que resulta pertinente retomar los lineamientos delineados por (Jaramillo y Baena, 2000) en los que contempla que la sola creación de un Banco de Germoplasma no garantiza la conservación de los recursos genéticos de interés para un país, ya que la conservación requiere apoyo institucional, es decir proveer de manera sostenida de recursos económicos, humanos y técnicos necesarios para mantener las colecciones y realizar las actividades de conservación.

V. LA IMPORTANCIA DEL REGISTRO DE LAS VARIEDADES DE USO COMÚN MEXICANAS

Resulta preciso reconocer que hoy día, en un mundo de relaciones económicas y comerciales globalizadas, los recursos genéticos constituyen un elemento que genera poder en los mercados de bienes agrícolas y representan un instrumento importante en las relaciones políticas internacionales. En este complejo escenario, para México, estas consideraciones adquieren mayor relevancia por ser origen de un gran número de especies vegetales, como el nopal (*Opuntia* spp.) y particularmente los nopales productores de xoconostle, el cual constituye uno de los recursos fitogenéticos de mayor trascendencia en el desarrollo histórico-cultural del pueblo mexicano.

Ante tal escenario, y en respuesta a la demanda de los productores de nopal y tuna del país, un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo, INIFAP, la Universidad Autónoma de San Luís Potosí, el CBTA 138 de Villa Hidalgo Zac., y del Instituto de Biología

de la UNAM, con el respaldo de sus instituciones, en un claro gesto de compromiso nacionalista, decidieron sumar conocimientos y esfuerzos para dar soporte a la ejecución del proyecto “*Caracterización morfológica de las principales selecciones o cultivares comerciales de tuna y nopal mexicanos*”. Los resultados de esta iniciativa se tradujeron en la descripción varietal de 95 cultivares, de las cuales 30 fueron Inscritas en el 2004 (Cuadro 2, a manera de ejemplo) con registro definitivo en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV-SNICS), 20 en el 2009, 20 en el 2011 y los 25 restantes entre 2015 y 2017. En la Figura 4 se muestra alguna de las variedades registradas, incluyendo su nomenclatura taxonómica y número de registro definitivo expedido por el CNVV-SNICS.

Cuadro 2. Listado de variedades de nopal inscritas en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV) con registro definitivo (SAGARPA, 2009).

Variedad	Nombre Científico	No. de registro definitivo	Descriptor/Institución
Amarilla Diamante	<i>O. ficus-indica</i>	NOP- 001-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Amarilla Miquihuana	<i>O. lasiacantha</i>	NOP- 002-221104	Javier Luna Vázquez, INIFAP-SLP
Amarilla Montesa	<i>O. megacantha</i>	NOP- 003-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Amarilla Plátano	<i>O. megacantha</i>	NOP- 004-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Blanca Gavia	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 005-221104	Javier Luna Vázquez, INIFAP-SLP
Blanca San José	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 006-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Bolañera	<i>O. undulata</i>	NOP- 007-221104	Clemente Gallegos V., (CRUCEN-UACH
Burrona	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 008-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Chapeada	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 009-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
COPENA F-I	<i>O. ficus-indica</i>	NOP- 010-221104	J. Antonio Reyes Agüero, IIZD-UASLP
Copena Torreoja	<i>O. megacantha</i>	NOP- 011-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Cristalina	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 012-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
COPENA V-I	<i>O. ficus-indica</i>	NOP- 013-221104	J. Antonio Reyes Agüero, IIZD-UASLP
Esmeralda	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 014-221104	R. Fernández/C. Mondragón, INIFAP-Gto.
Fafayuca	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 015-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Milpa Alta	<i>O. ficus-indica</i>	NOP- 016-221104	J. Antonio Reyes Agüero, IIZD-UASLP
Naranjón Legítimo	<i>O. megacantha</i>	NOP- 017-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Negro-Atlixco	<i>O. ficus-indica</i>	NOP- 018-221104	J. Concepción Martínez G., INIFAP-Pue.
Pico Chulo	<i>O. megacantha</i>	NOP- 019-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Reyna	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 020-221104	R. Fernández/C. Mondragón, INIFAP-Gto.
Rojo Lirio	<i>O. megacantha</i>	NOP- 021-221104	R. Fernández/C. Mondragón, INIFAP-Gto.
Rojo Pelón	<i>O. ficus-indica</i>	NOP- 022-221104	R. Fernández/C. Mondragón, INIFAP-Gto.
Roja de San Martín	<i>O. megacantha</i>	NOP- 023-221104	R. Fernández/C. Mondragón, INIFAP-Gto.
Rojo Vigor	<i>O. ficus-indica</i>	NOP- 024-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Tamazunchale	<i>N. cochenillifera</i>	NOP- 025-221104	J. Antonio Reyes Agüero, IIZD-UASLP
Villanueva	<i>O. albicarpa</i>	NOP- 026-221104	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
X. Cuaresmeño	<i>O. matudae</i>	NOP- 027-221104	J. Antonio Reyes Agüero, IIZD-UASLP
Xoconostle Blanco	<i>O. joconostle</i>	NOP- 028-221104	J. Antonio Reyes Agüero, IIZD-UASLP
Xoconostle Colorado	<i>O. joconostle</i>	NOP- 029-221104	J. Antonio Reyes Agüero, IIZD-UASLP
Xoconostle Chivo	<i>O. durangensis</i>	NOP- 030-221104	J. Antonio Reyes Agüero, IIZD-UASLP
Amarillo Oro	<i>O. albicarpa</i>	NOP-031-160709	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Bola de Masa	<i>O. albicarpa</i>	NOP-032-160709	Eloy Rodríguez Salazar, CBTA 188
Chicle	<i>O. ficus-indica</i>	NOP-033-160709	J. Concepción Martínez G., INIFAP-Pue.
COPENA Z-1	<i>O. albicarpa</i>	NOP-034-160709	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Roja Biznaga	<i>O. megacantha</i>	NOP-035-160709	Javier Luna Vázquez, INIFAP-San Luis
Rubí Reyna	<i>O. megacantha</i>	NOP-036-160709	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Tapón Aguanoso	<i>O. robusta var. robusta</i>	NOP-037-160709	Clemente Gallegos V., CRUCEN-UACH
Amarilla el Jarro	<i>O. albicarpa</i>	NOP-038-160709	Javier Luna Vázquez, INIFAP-San Luis
Amarilla Zacatecas	<i>O. albicarpa</i>	NOP-039-160709	Eloy Rodríguez Salazar, CBTA 188

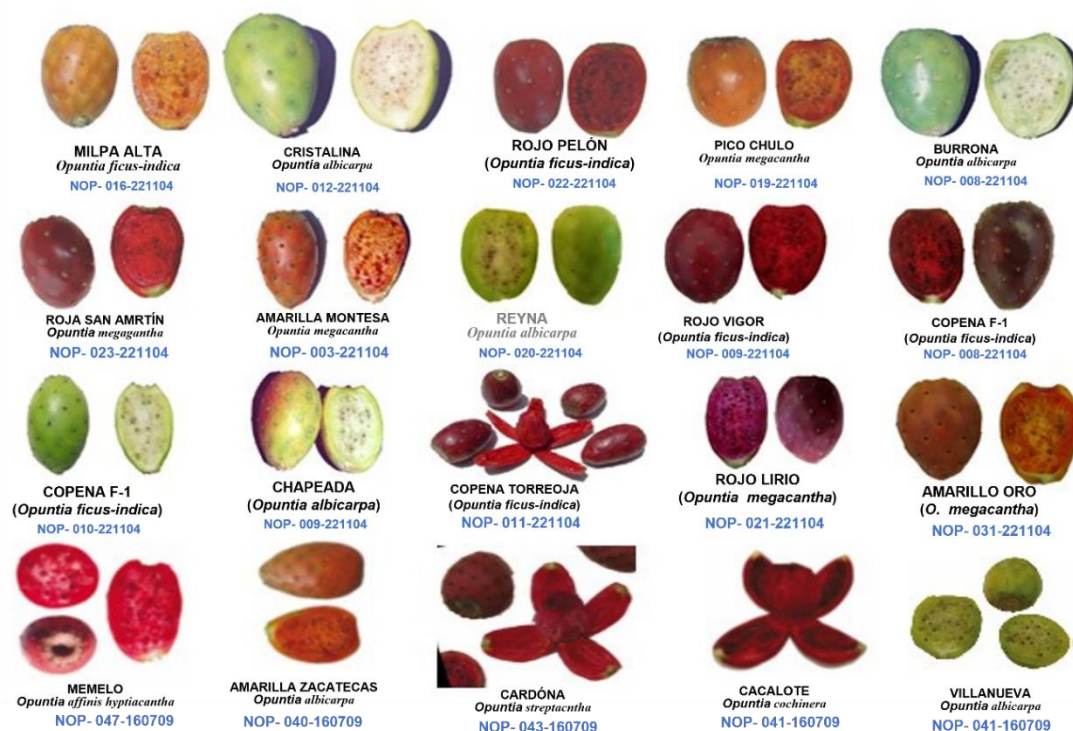


Figura 4. Principales variedades para la producción comercial de tuna en México registradas en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (CNVV-SNICS) (Fuente: Gallegos, 2016).

La meta lograda, no tiene precedentes en nuestro país y representa un ejemplo más de las posibilidades que tiene México cuando se unen los esfuerzos, voluntades y recursos de los productores, las instituciones de investigación, de enseñanza superior y de las instancias de gobierno en un objetivo de trascendencia nacional, pues con ello los productores mexicanos cuentan con el reconocimiento moral y legal para el aprovechamiento, explotación y libre acceso al mercado de los productos de nopal (Gallegos, 2007).

Finalmente, es preciso asentar que al efectuarse el registro de una variedad de uso común CNVV se renuncia a la exclusividad individual sobre su uso a fin de que la variedad permanezca en el dominio público y se constituya, en todo caso, en un mecanismo de salvaguarda en eventuales controversias comerciales con otros países.

El material vegetativo de referencia de los 95 cultivares se encuentra en custodia del Depositario Nacional de *Opuntia*, sito en las instalaciones del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo, localizadas en El Orito, Zacatecas, Zac, a los 22°74'6" Norte y 102°6'07" Oeste.

VI. GERMOPLASMA NATIVO PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN DE TUNA EN MÉXICO

Los trabajos recientes de recolección, caracterización y registro de materiales autóctonos ha producido una lista de 95 variedades disponibles para los productores mexicanos (Rodríguez y Nava, 1998; Fernández *et al.*, 2000; Gallegos y Mondragón, 2011 y 2013a), que incluyen las seis que actualmente dominan el mercado nacional y las dos que prevalecen en el mercado de exportación. Estas variedades fueron reconocidas recorriendo solares, huertos semicomerciales y comerciales de la zona centro de México, ellas representan lo mejor que el nopal tunero tiene para ofrecer.

Es indispensable acotar que aun utilizando efectivamente esta riqueza fitogenética no se solucionan completamente los principales problemas de la producción de nopal y tuna; es decir, persistirá el problema de las semillas, se atenuará la concentración de la cosecha, pero no se tendrán variedades resistentes a los principales problemas fitosanitarios actuales; chatilla, pudrición negra, cochinilla y picudos, u otros de carácter práctico como la alta presencia de ahuates en el fruto y la predominancia de variedades con espinas también continuaran sin solución. Sin embargo, esta variabilidad representa una materia prima invaluable para los programas de mejoramiento genético.

Ante las tendencias de mercado sobre la producción y comercialización de la tuna es indispensable contar con una estrategia que contemple la oportunidad que representa la introducción continua de nuevas variedades aprovechando la variabilidad genética nativa, y los productos del mejoramiento genético en nuestro país.

Dentro de la diversidad reunida en el acervo genético del Depositario Nacional de *Opuntia* existe una serie de cultivares con características sobresalientes para ser consideradas para su introducción a la producción comercial de tuna. En la obra “*Cultivares Selectos de Tuna, de México al Mundo*” (Gallegos y Mondragón, 2011) estos cultivares son descritos con cierto detalle, de los cuales en este escrito solo se hará referencia a un número limitado, considerando su mayor interés de ser considerados para fin antes mencionado, sin ser los únicos con potencial, por lo que en un programa de evaluación se pueden incluir otras más.

6.1 Roja Azteca (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)

La planta es vigorosa, de crecimiento arbustivo, con cladodios de forma oboval ancho, con 4 a 5 espinas. El fruto presenta cáscara de color rojo oscuro y pulpa es de color rosa, de jugosidad alta y consistencia firme, y representa el 43 % del peso total del fruto (125 g), con un número bajo (135) de semillas completamente desarrolladas y ninguna o muy pocas semillas abortadas. Su contenido de azúcares mayor de 12 °Brix. Por sus características de fruto, dentro de las que destaca el color rojo, su alta resistencia al manejo y particularmente su maduración tardía (octubre-noviembre), este cultivar puede resultar una opción para ampliar la oferta al mercado

6.2 Amarilla Plátano (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)

Sus frutos son de los más grandes de los cultivares evaluados de pulpa amarilla; con cáscara y pulpa color amarillo tenue en maduración de consumo. La pulpa es de consistencia firme y jugosidad alta, que alcanza el 60.2% del peso total (152.3 g), y con un número medio de semillas desarrolladas (226). Presenta un contenido alto de azúcares (13.1 °Brix). Es un cultivar de vigor y productividad intermedia y maduración tardía (septiembre-octubre). Este cultivar es considerado como sobresaliente por su calidad para el consumo en fresco y

resistencia alta al transporte. Experiencias locales indican que conserva sus características comerciales bajo el “apaseramiento”, potenciando así su disponibilidad hasta el final del año.

6.3 Amarilla jarro (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)

Las plantas de este cultivar presentan un desarrollo muy vigoroso, con hábito de crecimiento erguido. Sus cladodios grandes, presentan de 2 a 3 espinas cortas por areola, lo cual es una característica deseable para el manejo. Las tunas de este cultivar en estado de madurez son de jugosidad alta y de consistencia media. La pulpa es de color amarillo y representa el 61% del peso total del fruto (204 g), con un número alto de semillas completamente desarrolladas (307), pocas semillas abortadas y un contenido de sólidos solubles totales de alrededor de 13.38 °Brix. Es de maduración tardía (septiembre) y con un periodo de cosecha amplio, lo que le confiere una ventaja en la oportunidad de salir al mercado.

6.4 Venustiana (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)

Su fruto presenta pulpa de color rojo, de jugosidad alta y consistencia firme, con 204 semillas desarrolladas en promedio y pocas semillas abortadas y un contenido de azúcares de 15.5 °Brix. Además, presenta la ventaja de que no se desprende de la planta y mantiene sus características de consistencia de fruta hasta por dos meses. Es una nueva selección que está disponible para incorporar al padrón varietal de productores de tuna del centro norte del país, con ventajas de presentar buena resistencia al manejo postcosecha y pulpa roja, color demandado por el mercado de exportación.

6.5 Roja Sandía (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)

Su fruto presenta pulpa de color purpura, pulpa color rojo oscuro de jugosidad alta y consistencia firme, con 323 semillas desarrolladas en promedio y un contenido de azúcares de 14.8 °Brix.

Presenta un periodo de cosecha amplio hasta dos meses y medio, lo que constituye una ventaja, pues mantiene sus características de consistencia de fruta hasta por dos meses.

Por sus características de fruto, dentro de las que destaca el color rojo, su alta resistencia al manejo y particularmente su maduración intermedia a tardía (agosto-septiembre), este cultivar puede resultar una opción para ampliar la oferta al mercado.

6.6 Blanca San José (*Opuntia albicarpa* Scheinvar)

El fruto es grande de forma elíptica. La pulpa abarca el 61.9% del peso total (143.1 g) y presenta un número alto de semillas completamente desarrolladas (305), de tamaño grande y un contenido alto de azúcares (14.8 °Brix). Las principales ventajas de este cultivar son la buena calidad para el consumo en fresco, el tamaño de fruto y particularmente su época de maduración tardía que permite la entrada al mercado al final de la temporada de mayor oferta de otros cultivares, por lo que puede representar una opción de alargar el periodo de cosecha de regiones en las que las preferencias de consumo son de tunas de pulpa blanca o bien con temperaturas frescas.



Figura 5. Variedades representativas de nopal de uso frutícola. De arriba a derecha y de arriba abajo, Roja Azteca (*Opuntia megacantha* Sal-Dick), Amarilla Plátano (*Opuntia megacantha* Sal-Dick), Amarilla jarro (*Opuntia megacantha* Sal-Dick), Venustiana (*Opuntia megacantha* Sal-Dick), Roja Sandía (*Opuntia megacantha* Sal-Dick) y Blanca San José (*Opuntia albicarpa* Scheinvar).

La lista de cultivares con características sobresalientes se puede incrementar con otros, tales como:

- Chicle (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.)
- Roja Jalpa (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.)
- Roja globo (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)
- Amarilla Miquihuana (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)
- Blanca Pepina (*Opuntia albicarpa* Scheinvar)
- Anaranjada (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)
- Rojo Lirio (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)
- Xoconostle de invierno (*Opuntia tezontepecana* Gallegos & Scheinvar)
- Xoconostle Rojo Sainero (*Opuntia matudae* Scheinvar)
- Xoconostle Cuerón (*Opuntia matudae* Scheinvar)

En el caso de los productos industriales a base de nopal están en las etapas iniciales de desarrollo, y no se cuenta con una demanda que motive a los industriales a consumir los excedentes de las cosechas ni a invertir en investigación ni en infraestructura. Lo anterior refuerza la idea de que debemos explorar todas las posibilidades para consolidar la demanda de la tuna como fruta fresca. Para tal fin al igual que para tuna para consumo en fresco, existen cultivares con potencial en la industria de los colorantes y otros usos específicos que deben ser evaluados.

- Cacalote (*Opuntia cochinera* Griffiths)
- Tapón (*Opuntia megacantha* Sal-Dick)
- Tapón Mayero (*Opuntia robusta* Var. *Larreyi*)
- Tapón aguanoso (*Opuntia robusta* Var. *robusta*)
- Sangre de toro (*Opuntia megacantha* Salm-Dick)
- Morada (*Opuntia undulata* Griffiths)
- Tzaponopal Rojo (*Opuntia robusta* Var. *Larreyi*)

Falta probar su adaptación a las condiciones de cultivo de algunas de las zonas tuneras actuales y la aceptación por parte del consumidor. Asimismo, después de ser evaluadas es necesario someterlas a propagación con técnicas modernas, que garanticen su identidad genética y sanidad.

En definitiva, México está mejor posicionado que ningún otro país para desarrollar nuevas variedades y nuevos productos de nopal en sus tres modalidades: fruta, verdura y forraje, usando el germoplasma nacional de manera más eficiente y dinámica, sólo falta el interés de las instituciones y productores por apoyar proyectos novedosos de mediano y largo plazo, y proyectos que tomen en consideración las características biológicas únicas del nopal.

VII. Literatura citada

- Aguirre R., J. R. 1983. Enfoques para el estudio de las actividades agrícolas en le altiplano potosino-zacatecano. En: J. T. Molina G. (Ed.). Recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. pp. 105-115.
- Anderson, E.F. 2001. The Cactus Family. Timber Press. Portland, USA.
- Bravo-Hollis., H. y L. Scheinvar. 1995. El interesante mundo de las cactáceas. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 233 p.
- Bye, R. A. 1979. An 1878 ethnobotanical collection from San Luis Potosí: Dr. Edward Palmer's first major mexican collection. Economic Botany. 33:135-162.

- COMENTUNA, 2005. Plan Rector Sistema Producto Nacional Nopal. Comité Sistema Producto Nopal. SAGARPA-ITESM-INCA. (Documento interno). México D. F. 62 p.
- COMENTUNA, Red Nopal y CONABIO. 2008. Nopales, tunas y Xoconostles. Consejo Mexicano de Nopal y Tuna, A.C. Red Nopal. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Mapa, 1ª edición. México. D. F.
- Crespo O., A.M. 1976. Villa de Reyes, S.L.P: un núcleo agrícola en la frontera norte de Mesoamérica. Instituto Nacional de Antropología e historia. SEP.
- Cuevas S., J. A. 2002. Banco Nacional de germoplasma vegetal. Programa Nacional de Etnobotánica, Serie: Conservación de recursos vegetales No. 5. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Méx. 30 p.
- Esquinas A., J. 2003. Tratado Internacional sobre Recursos Fitogenéticos: una contribución importante para la construcción de un planeta sostenible y sin hambre. Consultado en la World Wide Web: waicent.fao.org/country/españa/ReFitoGen/rsostenibles.htm.
- Fernández M., M. R., C. Mondragón J., J. Luna A., L. A. Sáenz Q., J. A. Zegbe D., S. de J. Méndez G. y J. C. Martínez G. 2000. Principales cultivares mexicanos de nopal tunero. Campo Experimental Norte de Guanajuato, Centro de Investigación Regional del Centro, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. San Luis de la Paz, Gto., Méx. 34 p.
- FAO. 1996. Informe sobre el estado de los Recursos fitogenéticos en el mundo. Organización de las para la Alimentación y la Agricultura.
- Gallegos-Vázquez, C., F. Blanco-Macías y G. Noriega-Altamirano. 1994. Establecimiento de una colección de nopal (*Opuntia* spp) en el CRUCEN, Zacatecas, México. Rev. Geografía Agrícola. 137-141.
- Gallegos-Vázquez, C. 2007. Plan estratégico de la Red Nopal. En: Gallegos V., C. (Compilador). Recursos Fitogenéticos de Nopal (*Opuntia* spp.) en México:2002-2005. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SNICS-SAGARPA) y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, Méx. pp 6-30.
- Gallegos Vázquez, C. y A. Barrientos-Priego. 2009. Conservación para la Utilización Sustentable del Nopal en México. Tríptico. Zacatecas, Méx.
- Gallegos-Vázquez, C. y C. Mondragón-Jacobo. 2011. Cultivares Selectos de Tuna, de México al Mundo. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas – Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SNICS-SAGARPA) - Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Chapingo, Méx. 157 p.
- Gallegos V. y C. Mondragón J. 2013a. Los recursos fitogenéticos del nopal y cultivares de tuna disponibles para el Altiplano. En: Clemente Gallegos-Vázquez, Santiago de Jesús Méndez-Gallegos Candelario y Candelario Mondragón-Jacobo (Eds.). Producción sustentable de la tuna. Fundación Produce San Luis Potosí, A. C. San Luis potosí, S.L.P. pp 49-68.
- Gallegos V. y C. Mondragón J. 2013b. Aprovechamiento del Germoplasma Nativo para mejorar la Sustentabilidad del Cultivo de Nopal y Tuna. En: C. Mondragón-Jacobo (compilador, traductor). Las nuevas tendencias de la cadena Alimentaria en el mundo. 1er. Simposium Internacional Tuna Nopal 2013. Puebla, Pue., Méx. pp 74-87.
- Godínez-Álvarez, H. y P. Ortega-Baes. 2007. Mexican cactus diversity: environmental correlates and conservation priorities. Boletín de la Sociedad Botánica de México 81:81-87.

- Heiser, Ch. B. 1981. Seed to civilization, the history of food. Second edition. W. H. Freeman and Company. San Francisco, U.S.A. 243 p.
- Hunt D. 2002. Alphabetical list of currently accepted species. In: Hunt D and Taylor N (eds) *Studies in the Opuntioideae*. Sherborne, UK: The Manse and Chapel Lane, pp. 250-255.
- Inglese, P., C. Mandragón J.; A. Nefzaoui. 2018. Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Roma, Italia. 253 p.
- Loza-León J. G. 2007. Caracterización ecológica y aspectos sociales de los solares en relación con el bienestar en San José de la Peña, Villa de Guadalupe, San Luis Potosí. Tesis Maestría en Ciencias, Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales. Universidad de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S. L. P. México. 72 p.
- Mondragón J. y C. Gallegos V. 2013. Los sistemas de producción comercial de tuna en México y su aplicación en el Altiplano. En: Clemente Gallegos-Vázquez, Santiago de Jesús Méndez-Gallegos Candelario y Candelario Mondragón-Jacobo (Eds.). 2013. Producción sustentable de la tuna. Fundación Produce San Luis Potosí, A. C. San Luis Potosí, S.L.P. pp 37-48.
- Parfitt, B. D. y A. C. Gibson. 2003. Cactaceae. Flora of North America Vol. 4:128,137.
- Powell, P. W. 1977. La guerra chichimeca (1550-1600). Fondo de Cultura Económica. México, D. F. México. 308 p.
- Reyes A., J.A.; Aguirre R., J.R.; F. Carlin C. 2004. Análisis preliminar de la variación morfológica de 38 variantes mexicanas de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller En: G. Esparza F.; R.D. Valdez Z.; S.J. Méndez G. El nopal, tópicos de actualidad. Universidad Autónoma Chapingo y Colegio de Postgraduados. Chapingo, Méx. pp. 21-47.
- Reyes-Agüero, J. A. 2005. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) y su relación con la domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. Tesis Doctoral, Postgrado en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 180 p.
- Reyes-Agüero, J.A.; J.R. Aguirre R.; J.L. Flores F. 2005a. Variación morfológica de *Opuntia* (Cactaceae) en relación con su domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. Interciencia. 30(8):476-484.
- Reyes-Agüero., J.A.; Aguirre R., J.R. y H. Hernández. 2005b. Systematic notes and detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). Agrociencia. 39:395-408.
- Reyes A., J.A. y J.R. Aguirre R. 2006. Geographical distribution of *Opuntia* in Mexico. Proceedings of the 2006 International Cactus Pear Conference. University of the Free State, Bloemfontein, South Africa. p. 18.
- Rodriguez-Salazar, E. y A. Nava-Cedillo. 1998. Nopal, riqueza agroecológica de México. Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria, Secretaría de Educación Pública. México, D. F. 160 p.
- Rzedowski, J. 1978. *La vegetación de México*. Limusa. México, D.F. 432 p.
- SAGARPA. 2009. Catálogo Nacional de Variedades Vegetales (C.N.V.V.). Publicación anual No. 2, Año 3. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://www.sagarpa.gob.mx/snics/publicaciones/CNVV-2009.pdf>
- Sahagún, Fr. B. de. 2001. Historia general de las cosas de la Nueva España. Dastin. Madrid, España.
- Sheinvar, L.; C. Gallegos-Vázquez; N. Gámez-Tamaríz; G. Olalde Parra. 2020. Atlas de los Nopales Silvestres Mexicanos. 1RA. Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. CDMX. 607 p.

- SIAP. 2016. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Avance de Siembras y Cosechas Perennes 2015. <http://www.sagarpa.gob.mx/sagar5htm>.
- Sodi P. E. 1968. Las cactáceas en la épocas pre-colombina y virreynal. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* 13:3-12.
- Stuppy, W. 2002. Seed characters and the generic classification on the *Opuntioideae* (*Cactaceae*). In: Hunt, D. and N. Taylor (Eds.). *Studies in the Opuntioideae*. The Manse and Chapel Lave. Sherborne, UK. pp. 25–58.
- Wallace, R.S. and S.L. Dickie. 2002. Systematic Implications of Chloroplast DNA Sequence Variation in Subfam. *Opuntioideae* (*Cactaceae*). In: Hunt, D. and N. Taylor (Eds.). *Studies in the Opuntioideae*. The Manse and Chapel Lave. Sherborne, UK. pp. 9–24.

3. GENÓMICA Y TRANSCRIPTÓMICA APLICADA AL GÉNERO *OPUNTIA*

¹Cruz-Cárdenas C. I., ²Aragón-Magadán M. A. y ²Guzmán-Rodríguez L. F.

¹Colección de Semillas del Centro Nacional de Recursos Genéticos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

²Colección de Ácidos Nucleicos del Centro Nacional de Recursos Genéticos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Correspondencia: CRCI, ORCID: 0000-0002-1952-0191, cruz.ivan@inifap.gob.mx

Tema	Página
I. Resumen.	77
II. Introducción.	77
2.1 Nivel de ploidía del género <i>Opuntia</i> .	78
2.2 Tamaño del genoma de especies del género <i>Opuntia</i> .	78
III. Secuenciación del genoma de <i>Opuntia</i> .	80
3.1 Genoma del cloroplasto de <i>Opuntia</i> .	80
3.2 Genoma de la mitocondria de <i>Opuntia</i> .	80
3.3 Transcriptómica.	80
3.4 Transcriptómica y la secuenciación del RNA.	81
IV. La familia Cactaceae y el transcriptoma.	82
4.1 El género <i>Opuntia</i> y la transcriptómica.	83
V. Literatura citada.	84

I. RESUMEN

El género *Opuntia* es uno de los más importantes, emblemáticos y prometedores de México, y aún no se dispone de información genómica y transcriptómica extensa en las especies que comprenden al género. En este capítulo, presentamos los resultados de datos genómicos y transcriptómicos de algunas investigaciones realizadas en *Opuntia*. En general, los datos genómicos y transcriptómicos generados proporcionan los recursos iniciales para comprender la biología del género *Opuntia*, ofreciendo nuevos conocimientos para comprender su morfología, sistemática y adaptación. Los resultados presentados aquí proporcionan recursos para futuros estudios de *Opuntia* y linajes relacionados, que es un clado importante para estudios genómicos, demográficos y evolutivos comparativos. Creemos que todos los trabajos puestos en materia de caracterización genómica y transcriptómica del género *Opuntia* puede ayudar a futuros estudios encaminados a desarrollar herramientas moleculares para impulsar programas de mejoramiento y programas de conservación.

II. INTRODUCCIÓN

El genoma es el conjunto completo de DNA de un organismo o especie. A través de los últimos años se han descrito los genomas de microorganismos, hongos, plantas, animales

y del humano, no obstante, no ha sido una labor sencilla. Actualmente se emplean técnicas modernas de secuenciación de nueva generación, que han acelerado el proceso, para conocer la secuencia completa de DNA de una especie (Meera-Krishna *et al.*, 2019). El genoma de las plantas es el más diverso en cuanto al tamaño y nivel de ploidía (Granados-Aguilar *et al.*, 2021; Michael y VanBuren, 2020) en comparación con otros reinos; el rango de longitud es de 10 Mb a 100 Gb (Kersey 2019).

2.1 Nivel de ploidía del género *Opuntia*

Las plantas son un caso peculiar debido al tamaño del genoma y el nivel de ploidía de algunas especies. Particularmente, las especies del género *Opuntia* cuentan con 11 cromosomas ($x = 11$), algunas son diploides ($2x = 22$), otras son poliploides (por ejemplo: $4x = 44$, $6x = 66$ u $8x = 88$) y también existen especies con tipos compuestos de células diploides y poliploides (Torres da Silva *et al.*, 2022).

2.2 Tamaño del genoma de especies del género *Opuntia*

El tamaño de genoma es la cantidad total de DNA haploide y sin duplicar que se encuentra en el núcleo celular, el cual, es importante en la dinámica de los genes y en el crecimiento de las plantas (Pellicer y Leitch, 2019).

A través del estudio del género *Opuntia* con núcleos de células madre del polen mediante citometría de flujo y con uso de estándares internos de *Solanum lycopersicum* y *Pisum sativum* L., la especie diploide ($2n = 22$) *O. heliabravoana* contiene 3.81 pg de DNA, lo cual representa 1.91 pg de genoma monoploide con una longitud de 1,863 Mb. Por otra parte, las especies hexaploides ($2n = 66$) *O. joconostle*, *O. Matudae*, *O. oligacantha*, contienen 5.84, 5.91 y 5.98 pg de DNA, lo cual representa 0.97, 0.99 y 1.00 pg de genoma monoploide con una longitud de 952, 963 y 975 Mb, respectivamente. Además, las especies octaploides ($2n = 88$) *O. hyptiacantha* and *O. tomentosa* contienen 7.39 y 7.43 pg de DNA, lo cual representa 0.92 y 0.93 pg de genoma monoploide con una longitud de 903 y 908 Mb, respectivamente (Figura 1) (Palomino *et al.*, 2016).

En otro estudio, determinaron el tamaño del genoma de 26 especies del género *Opuntia* y de *Cylindropuntia imbricata* (Segura *et al.*, 2007). Las especies incluidas fueron: dos diploides (2X), cuatro tetraploides (4X), tres hexaploides (6X) y 18 octaploides (8X). En la figura 2 se presenta el nivel de ploidía con líneas naranjas y el tamaño del genoma con las líneas azules. Los valores del tamaño del genoma van de 4.35 a 6.92 pg de DNA.

Por otra parte, en la base de datos de valores C del DNA de plantas, administrado por Kew Royal Botanic Gardens, se describe el tamaño del genoma de las especies *O. violácea*, *O. microdasys*, *O. dillenii* y *O. acaulis* con valores de 2.04, 2.24, 2.28 y 3.80 pg, respectivamente (Leitch *et al.*, 2019).

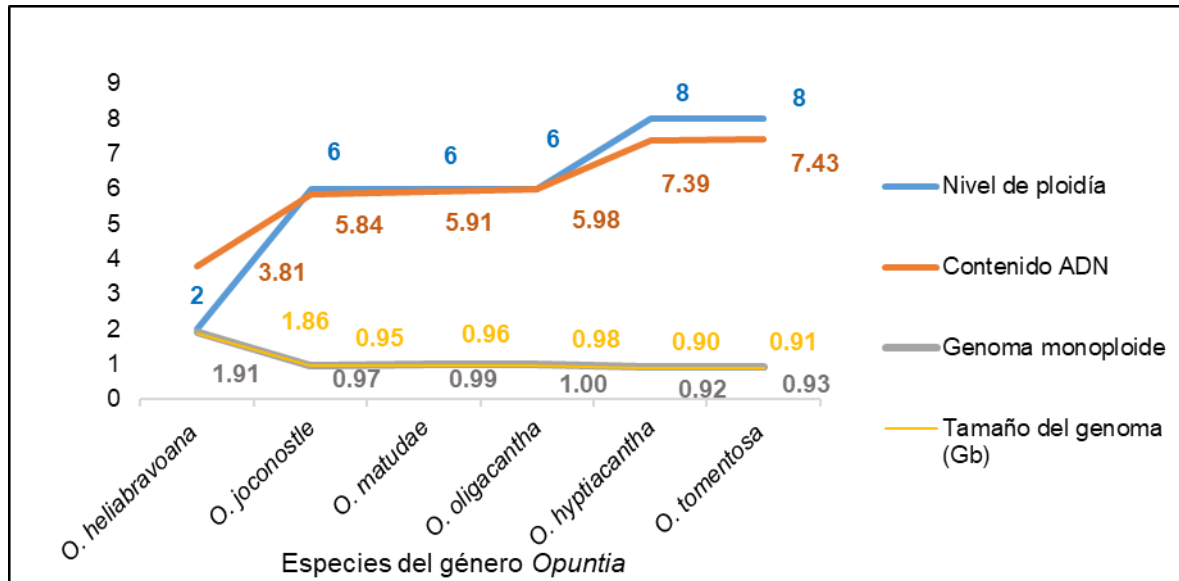


Figura 1. Tamaño del genoma y nivel de ploidía de seis especies del género *Opuntia* (Palomino *et al.*, 2016).

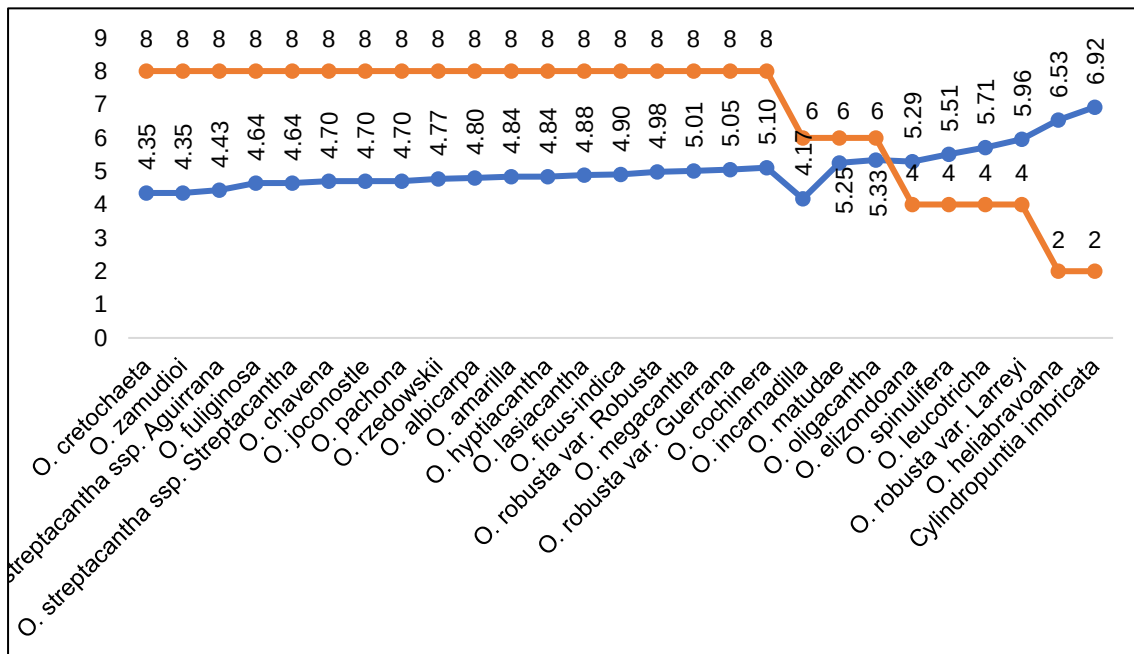


Figura 2. Tamaño del genoma y nivel de ploidía de 26 especies del género *Opuntia* y *Cylindropuntia imbricata* (Segura *et al.*, 2007).

III. SECUENCIACIÓN DEL GENOMA DE OPUNTIA

A pesar del aumento en la secuenciación de genomas de distintas especies de plantas, los avances en las tecnologías y reducción de costos para secuenciar DNA, de acuerdo con la base de datos de NCBI, aún no se cuenta con un genoma completo del nopal o alguna especie del género *Opuntia* (NCBI, 2023), incluso de la familia de las cactáceas (Marks *et al.*, 2021).

Los primeros genomas de plantas reportados fueron de especies diploides debido en cierta medida por las técnicas de secuenciación y con genomas pequeños, no obstante, con las nuevas tecnologías es posible secuenciar cualquier genoma de plantas (Marks *et al.*, 2021). Cabe resaltar que en plantas se han reportado más de 1,000 genomas (Sun *et al.*, 2021) de 788 diferentes especies (Marcas *et al.*, 2021), ninguna sobre el género *Opuntia*. No obstante, está reportado el genoma del cloroplasto de las especies *Opuntia quimilo* (Köhler *et al.*, 2020) y *Opuntia sulphurea* (Chen *et al.*, 2022).

3.1 Genoma del cloroplasto de Opuntia

Existen dos estudios sobre el genoma del cloroplasto en especies del género *Opuntia*. En 2020, Köhler *et al.* reportan un ensamble de *novi* del plastoma de la especie *Opuntia quimilo* con 150,347 pb de longitud, en el cual se incluyen: la familia de genes *ndh*, repeticiones, translocaciones, inversiones y pseudogenes (Köhler *et al.*, 2020).

El plastoma de *Opuntia sulphurea* se reportó en el año 2022, con una longitud de 122,740 pb y alta relación filogenética con *Opuntia quimilo* (Chen *et al.*, 2022). El tamaño del plastoma de *Opuntia quimilo* y *Opuntia sulphurea*, en comparación con genomas de cloroplasto de otras plantas, se encuentra dentro del rango, puesto que se han reportado desde 19 kb en orquídeas hasta 217 kb en geraniáceas (Köhler *et al.*, 2020; Dobrogojski *et al.*, 2020), aunque generalmente el plastoma de plantas fotosintéticas fanerógamas tienen una longitud entre 120 a 160 Kb de longitud (Qu *et al.*, 2023).

3.2 Genoma de la mitocondria de Opuntia

Actualmente no se encuentra reportado algún mitogenoma en especies del género *Opuntia*, de acuerdo con los resultados obtenidos de la búsqueda en la base de datos de NCBI (NCBI, 2023). En la familia de las cactáceas, se encuentra reportado el mitogenoma en varias especies de angiospermas, entre ellas, *Mammillaria huitzilopochtli*, el cual contiene 2,052 Kb de longitud, uno de los mitogenomas más grandes reportados (Plancarte y Solórzano, 2023), debido a que existe un amplio rango de longitud desde 191 kb a 11,319 kb (Kozik *et al.*, 2019).

3.3 Transcriptómica

La transcriptómica es una rama de la genómica funcional que se centra en el estudio exhaustivo del conjunto total de ARN generado en una célula o tejido en un momento específico y bajo condiciones particulares, estableciendo así un enlace entre el genoma, el proteoma y el fenotipo. Este enfoque proporciona una visión más amplia y dinámica de la expresión génica y constituye una herramienta indispensable para comprender los mecanismos moleculares subyacentes en diversas condiciones biológicas, tales como el desarrollo, procesos de enfermedad, la respuesta ante estímulos ambientales, entre otros (Pavelić *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2014).

A su vez, la genómica funcional, en un sentido amplio, engloba la transcriptómica, proteómica y metabolómica, y busca descifrar cómo la información genética se traduce en características funcionales a nivel celular y de organismo. En este contexto, la transcriptómica proporciona una visión detallada del perfil de expresión de ARN en una célula o tejido, lo que a su vez establece un vínculo crucial entre el genoma, el proteoma y el fenotipo, es decir, cómo la información genética se traduce en estructuras proteicas y finalmente en características fenotípicas (Yang *et al.*, 2014).

A pesar de que la transcriptómica se conocía desde principios de los años 90 (Lowe *et al.*, 2017), no fue sino hasta la llegada de las Tecnologías de Secuenciación de Nueva Generación (NGS) en 2005, que esta disciplina ganó un impulso significativo en la comunidad científica. Gracias a la capacidad de las NGS para generar datos de secuenciación masiva a una fracción del costo y del tiempo en comparación con los métodos tradicionales, la transcriptómica se ha posicionado en la vanguardia de la investigación genómica. Las NGS no solo la han hecho más accesible y eficiente, sino que también han enriquecido la calidad y profundidad de los análisis al desarrollar diversas técnicas de secuenciación.

3.4 La transcriptómica y la secuenciación del RNA

La secuenciación de RNA, o RNA-seq, es una técnica que permite explorar el conjunto total de transcripciones de RNA de una célula o tejido en condiciones específicas. Con el avance de las NGS han surgido una gran diversidad de métodos y tipos de secuenciación, cada uno diseñado para satisfacer diferentes objetivos de investigación.

Secuenciación de RNA a granel (Bulk RNA-seq): Este tipo de secuenciación abarca los transcritos completos de RNA en una muestra de múltiples células o tejidos. Es uno de los métodos más utilizados y se divide en dos tipos (Li y Wang, 2021).

1. **Secuenciación de mRNA:** Se enfoca solo en la secuenciación de RNA mensajero (mRNA).
2. **Secuenciación del transcriptoma completo:** Incluye todas las especies de RNA excepto el RNA ribosomal (rRNA)

Secuenciación de RNA de una sola célula (scRNA-seq): Permite la identificación y caracterización de una sola célula. Se emplea principalmente para analizar linajes o cuando la naturaleza de la muestra es heterogénea (Ding *et al.*, 2020; Li y Wang, 2021).

Secuenciación de RNA dirigida (targeted RNA-seq): Se utiliza para examinar la expresión de un conjunto específico de genes.

Secuenciación de RNA específica de hebra (Strand-specific RNA-seq): Mejora la identificación de transcritos antisentido, determinación de la hebra transcrita de RNAs no codificantes y demarcación de los límites de genes cercanos o superpuestos (Levin *et al.*, 2010).

Secuenciación de RNA de una sola molécula en tiempo real (SMRT): Permite la secuenciación de moléculas de RNA nativas en tiempo real.

Secuenciación de RNAs pequeños: Se utiliza para secuenciar RNAs pequeños como los MicroRNAs (miRNA) los cuales tienen un rol importante en los procesos de regulación génica (Benesova *et al.*, 2021).

Secuenciación de RNAs largos no codificantes (lncRNA-seq): Esta tecnología está dirigida a los RNA no codificantes de más de 200 pb, los cuales son muy abundantes en los eucariontes e incluyen a el RNAlinc (ARNc intergénicos), ARNc intrónicos, antisentido, sentido y bidireccionales. Estas moléculas no sintetizan proteínas pero están involucradas en la regulación de la transcripción, modificaciones postranscripcionales y la epigenética (Wang y Chekanova, 2019).

Secuenciación de RNA Procariótico: Se centra en la secuenciación de los RNAs de comunidades bacterianas. Los métodos de secuenciación de RNA convencionales suelen asumir que las muestras están libres de procariotas, lo que hace que la aplicación de esta técnica específica sea fundamental en el ámbito de la microbiología (Blattman *et al.*, 2020).

Secuenciación del metatranscriptoma: El RNA-seq del metatranscriptoma es una técnica que permite explorar la actividad transcripcional de comunidades microbianas complejas en un momento dado, proporcionando una instantánea de los genes que están siendo expresados activamente en un ambiente o condición particular (Aguar-Pulido *et al.*, 2016).

Secuenciación por Análisis masivo 3' de los extremos del cDNA (MACE RNA-seq): Esta variante del RNA-seq es una de las tecnologías más recientes en el mercado. MACE-seq genera una sola secuencia a partir del extremo 3' de cada transcripto poliadenilado, lo que permite un análisis eficiente y detallado del transcriptoma de un tejido o célula en particular. A diferencia de la secuenciación a granel de RNA, en esta técnica cada transcripto se representa por una sola molécula o "etiqueta" derivada del extremo 3' del mRNA, ofreciendo una visión detallada de la expresión génica a nivel de transcripción individual (Boneva *et al.*, 2020).

IV. LA FAMILIA CACTACEAE Y EL TRANSCRIPTOMA

La familia Cactaceae, conocida comúnmente como la familia de los cactus, engloba una amplia diversidad de especies que son emblemáticas de ambientes áridos y semiáridos. Estas plantas han evolucionado a lo largo de millones de años para adaptarse a condiciones extremadamente desafiantes, caracterizadas por la escasez de agua y temperaturas elevadas. Las adaptaciones morfológicas y fisiológicas, como la presencia de espinas en lugar de hojas y la capacidad de almacenar agua en sus tejidos, les permiten sobrevivir y prosperar en estos entornos inhóspitos.

A nivel genómico, los estudios de transcriptómica en cactáceas como *Pachycereus pringlei* han proporcionado una visión sobre la regulación genética de la determinación del crecimiento de la raíz, destacando cómo el agotamiento del meristemo apical de la raíz contribuye a su crecimiento determinado (Rodríguez-Alonso *et al.*, 2018). En otro enfoque, especies como *Melocactus glaucescens* y *Mammillaria bombycina* se han realizado estudios sobre su adaptación a la propagación *in vitro* y la supervivencia de estas especies en condiciones adversas (Enríquez-González *et al.*, 2022; Torres-Silva *et al.*, 2021). En pitayas y pitahayas (*Selenicereus* spp.), un género de cactáceas de importancia económica, se han podido describir genes asociados con el metabolismo del azúcar, descubriendo cómo las enzimas VAI y NI, vinculadas a la acumulación de glucosa y fructosa, juegan un papel integral en el desarrollo de la fruta (Z. Zhang *et al.*, 2022). Además, los estudios transcriptómicos han proporcionado información sobre el crecimiento *in vitro* de plántulas, al desvelar cómo las variaciones en el contenido de proteínas, azúcares y otros compuestos

bioactivos como polifenoles y flavonoides se ven alterados durante este proceso (Huang *et al.*, 2022).

En un intento por entender las disparidades genéticas entre las pitahayas silvestres y cultivadas, los investigadores han explorado el transcriptoma del tallo, lo que podría ser una vía para mejorar las variedades cultivadas (Oltehua-López *et al.*, 2023). La exploración de los mecanismos moleculares que promueven la floración a través de la transcriptómica comparativa abre una puerta hacia el desarrollo de variedades con insensibilidad al fotoperiodo, lo que podría ser un avance significativo para garantizar la producción durante todo el año con menores costos energéticos (Xiong *et al.*, 2020).

Aunque la implementación de la transcriptómica brinda una comprensión más profunda de la diversidad genética, los aspectos moleculares y la adaptación de las plantas a los desafíos ambientales, su aplicación en la familia botánica de las cactáceas aún se encuentra en una etapa incipiente. Una búsqueda meticulosa realizada en el National Center for Biotechnology Information (NCBI) en octubre de 2023, reveló que, de los 206,087 proyectos registrados en el ámbito de la transcriptómica, tan solo 26 corresponden a cactáceas, y la cifra se contrae aún más a sólo 3 trabajos para el género *Opuntia*. La disponibilidad de datos en bibliotecas transcriptómicas refleja una tendencia similar; de casi 4 millones de registros disponibles, apenas 442 pertenecen a cactáceas y 109 de estos están asociados con el género *Opuntia*. Los hallazgos emergentes, aunque limitados, han empezado a arrojar luz sobre la regulación genética de características cruciales como el metabolismo del azúcar y la floración en ciertas especies. Sin embargo, queda un vasto territorio inexplorado que necesita los esfuerzos de instituciones de investigación públicas y privadas.

4.1 El género *Opuntia* y la transcriptómica

A pesar de la notable relevancia del género *Opuntia*, la investigación centrada en la transcriptómica de este género es sumamente limitada. En la publicación titulada "The first transcriptomic analyses of fruits and cladodes for comparison between three species of *Opuntia*" (Valadez-Moctezuma *et al.*, 2023), los autores presentan un análisis exhaustivo del transcriptoma de tres especies de *Opuntia* (*O. ficus-indica*, *O. robusta*, *O. joconostle*) utilizando la tecnología de secuenciación MACE RNA-seq. Los resultados revelan que entre el 22.2% y el 23.7% de los transcritos identificados en estas tres especies pudieron ser anotados, lo que pone de manifiesto un nivel significativo de desconocimiento en relación con los genes y las vías metabólicas en las que estos participan.

La finalidad principal del estudio mencionado consistió en identificar diferencias significativas en la expresión génica entre las tres especies analizadas. Entre los genes que se destacaron por su sobreexpresión, se encuentran FULL, CYP75B1 y CMB1. El gen CYP75B1 es ampliamente reconocido por su participación en la biosíntesis de flavonoides, en particular en el proceso de hidroxilación. Este gen es responsable de codificar una enzima perteneciente al grupo del citocromo P450, la cual cataliza la reacción necesaria para la producción de compuestos con color, desempeñando un papel crucial en la pigmentación de las plantas. (Pandian *et al.*, 2020; Werck *et al.*, 2002).

Por otro lado, el gen CMB1 está asociado con la regulación del pH en las vacuolas de las células vegetales. Este gen es conocido por codificar un componente del complejo vacuolar ATPasa (V-ATPase), que es esencial para acidificar las vacuolas. El proceso de acidificación es crucial para numerosos procesos celulares incluyendo el almacenamiento

de nutrientes, degradación de proteínas y homeostasis iónica. Al gestionar los niveles de pH dentro de las vacuolas, el gen CMB1 juega un papel vital en el mantenimiento del entorno celular general (Fleck *et al.*, 1998; X. Zhang *et al.*, 2018).

Es importante destacar que, hasta el momento, la publicación de Velázquez-Moctezuma representa la única fuente de información disponible en relación con el empleo de la transcriptómica en el estudio del género *Opuntia*. Esto denota la ausencia de investigaciones que hagan uso de esta tecnología para este importante recurso, lo cual refleja un área de estudio aún por explorar en profundidad. Esta situación, al mismo tiempo, brinda una valiosa oportunidad para abrir nuevas y prometedoras líneas de investigación en este campo que pueden arrojar luz sobre aspectos fundamentales de la biología y la genética de las especies de *Opuntia*.

Explorar el transcriptoma de las distintas especies de *Opuntia* podría proporcionar información crucial sobre la adaptación, la respuesta al estrés ambiental, las vías metabólicas específicas por solo mencionar algunas. Así pues, la publicación de Velázquez-Moctezuma no solo representa un hito importante, sino también un llamado a la acción para futuros estudios que contribuyan a generar información sobre los genes y las rutas metabólicas de este género de plantas.

VII. Literatura citada

- Aguiar-Pulido, V., Huang, W., Suarez-Ulloa, V., Cickovski, T., Mathee, K. y Narasimhan, G. 2016. Metagenomics, metatranscriptomics, and metabolomics approaches for microbiome analysis. *Evolutionary Bioinformatics Online*, 12 (Suppl 1), 5–16. <https://doi.org/10.4137/EBO.S36436>
- Benesova, S., Kubista, M. y Valihrach, L. 2021. Small RNA-sequencing: approaches and considerations for miRNA Analysis. *Diagnostics*, 11(6), 964. <https://doi.org/10.3390/diagnostics11060964>
- Blattman, S. B., Jiang, W., Oikonomou, P. y Tavazoie, S. 2020. Prokaryotic single-cell RNA sequencing by in situ combinatorial indexing. *Nature Microbiology*, 5(10), Article 10. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-0729-6>
- Boneva, S., Schlecht, A., Böhringer, D., Mittelviefhaus, H., Reinhard, T., Agostini, H., Auw-Haedrich, C., Schlunck, G., Wolf, J. y Lange, C. 2020. 3' MACE RNA-sequencing allows for transcriptome profiling in human tissue samples after long-term storage. *Laboratory Investigation*, 100(10), Article 10. <https://doi.org/10.1038/s41374-020-0446-z>
- Chen J, Zhang S, Tang W, Du X, Yuan Y. y Wu S. 2022. The complete chloroplast genome sequence of *Opuntia sulphurea* (Cactaceae). *Mitochondrial DNA B Resour.* 10;7(2):361-362. <https://doi: 10.1080/23802359.2022.2035837>.
- Dobrogojski J, Adamiec M. y Luciński R. 2020. The chloroplast genome: a review. *Acta Physiologiae Plantarum*. 42, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03089-x>.
- Ding, J., Adiconis, X., Simmons, S. K., Kowalczyk, M. S., Hession, C. C., Marjanovic, N. D., Hughes, T. K., Wadsworth, M. H., Burks, T., Nguyen, L. T., Kwon, J. Y. H., Barak, B., Ge, W., Kedaigle, A. J., Carroll, S., Li, S., Hacohen, N., Rozenblatt-Rosen, O., Shalek, A. K., ... Levin, J. Z. 2020. Systematic comparison of single-cell and single-nucleus RNA-sequencing methods. *Nature Biotechnology*, 38(6), Article 6. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0465-8>
- Enríquez-González, C., Garcidueñas-Piña, C., Castellanos-Hernández, O. A., Enríquez-Aranda, S., Loera-Muro, A., Ocampo, G., Pérez-Molphe Balch, E., & Morales-Domínguez, J. F. 2022. De novo transcriptome of *Mammillaria bombycina*

- (Cactaceae) under in vitro Conditions and identification of glyoxalase genes. *Plants* (Basel, Switzerland), 11(3), 399. <https://doi.org/10.3390/plants11030399>
- Fleck, O., Kunz, C., Rudolph, C., y Kohli, J. 1998. The high mobility group domain protein Cmb1 of *Schizosaccharomyces pombe* binds to cytosines in base mismatches and opposite chemically altered guanines*. *Journal of Biological Chemistry*, 273(46), 30398–30405. <https://doi.org/10.1074/jbc.273.46.30398>
- Granados-Aguilar X., Granados-Mendoza C., Cervantes C. R., Montes J. R. y Arias S. 2021. Unraveling reticulate evolution in *Opuntia* (Cactaceae) from southern Mexico. *Frontiers in Plant Science*, 11, 606809.
- Huang, W., Yang, G., Liu, D., Li, Q., Zheng, L., y Ma, J. 2022. Metabolomics and transcriptomics analysis of vitro growth in pitaya plantlets with different LED Light spectra treatment. *Industrial Crops and Products*, 186, 115237. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115237>
- Köhler, M., Reginato M., Souza-Chies T. T. y Majure L. C. 2020. Insights into chloroplast genome evolution Across *Opuntioideae* (Cactaceae) reveals robust yet sometimes conflicting phylogenetic topologies. *Front. Plant Sci.* 11, 729. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00729>.
- Kersey, P. J. 2019. Plant genome sequences: past, present, future, *Current Opinion in Plant Biology*.48, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2018.11.001>.
- Kozik, A., Rowan B. A., Lavelle D., Berke L., Schranz M. E., Micheltmore R. W. y Christensen A. C. 2019. The alternative reality of plant mitochondrial DNA: One ring does not rule them all. *PLoS Genet.* 30;15(8), e1008373. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1008373>.
- Leitch, I. J., Johnston E., Pellicer J., Hidalgo O. y Bennett M. D. 2019. Angiosperm DNA C-values database (release 9.0, Apr 2019) <https://cvalues.science.kew.org/>.
- Levin, J. Z., Yassour, M., Adiconis, X., Nusbaum, C., Thompson, D. A., Friedman, N., Gnirke, A., y Regev, A. 2010. Comprehensive comparative analysis of strand-specific RNA sequencing methods. *Nature methods*, 7(9), 709–715. <https://doi.org/10.1038/nmeth.1491>
- Li, X., y Wang, C.-Y. 2021. From bulk, single-cell to spatial RNA sequencing. *International Journal of Oral Science*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41368-021-00146-0>
- Lowe, R., Shirley, N., Bleackley, M., Dolan, S., & Shafee, T. (2017). Transcriptomics technologies. *PLoS Computational Biology*, 13(5), e1005457. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005457>
- Marks, R. A., Hotelling S., Frandsen P. B., VanBuren R. 2021. Representation and participation across 20 years of plant genome sequencing. *Nat Plants*. 7(12), 1571-1578. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-01031-8>.
- Meera-Krishna B., Khan M. A. y Khan S. T. 2019. Next-generation sequencing (NGS) platforms: an exciting era of genome sequence analysis. *Microbial Genomics in Sustainable Agroecosystems*. 2, 89-109.
- Michael, T. P. y VanBuren R. 2020. Building near-complete plant genomes, *Current Opinion in Plant Biology*. 54, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.009>.
- National Center for Biotechnology Information (NCBI). 1988. Bethesda (MD): National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>. Revisado 27 de noviembre de 2023.
- Oltehua-López, O., Arteaga-Vázquez, M. A., y Sosa, V. 2023. Stem transcriptome screen for selection in wild and cultivated pitahaya (*Selenicereus undatus*): An epiphytic cactus with edible fruit. *Peer J*, 11, e14581. <https://doi.org/10.7717/peerj.14581>

- Palomino, G., Martínez J., Méndez I., Muñoz-Urías A., Cepeda-Cornejo V. y Pimienta-Barrios E. 2016. Nuclear genome size, ploidy level and endopolyploidy pattern in six species of *Opuntia* (Cactaceae). *Caryologia*. 69(1), 82–89. <https://doi.org/10.1080/00087114.2015.1109956>.
- Pandian, B. A., Sathishraj R., Djanaguiraman M., Prasad P. V. V., y Jugulam M. 2020. Role of Cytochrome P450 Enzymes in Plant Stress Response. *Antioxidants*, 9(5), 454. <https://doi.org/10.3390/antiox9050454>
- Pavelić, K., Kralj M., Kraljević S., y Sedić M. 2008. 4. Global Approach to biomedicine: functional genomics and proteomics. *EJIFCC*, 19(1), 22–30.
- Pellicer J & Leitch IJ. 2020. The Plant DNA C-values database (release 7.1): an updated online repository of plant genome size data for comparative studies. *New Phytologist*. 226(2), 301–305. <https://doi.org/10.1111/NPH.16261>.
- Plancarte, D. C. y Solórzano S. 2023. Structural and gene composition variation of the complete mitochondrial genome of *Mammillaria huitzilopochtli* (Cactaceae, Caryophyllales), revealed by de novo assembly. *BMC Genomics*. 24(1), 509. <https://doi.org/10.1186/S12864-023-09607-8>.
- Qu XJ, Zou D., Zhang R. Y., Stull G. W. y Yi T. S. 2023. Progress, challenge and prospect of plant plastome annotation. *Frontiers in Plant Science*. 14, 1166140. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1166140/FULL>.
- Rodriguez-Alonso, G., Matvienko M., López-Valle M. L., Lázaro-Mixteco P. E., Napsucialy-Mendivil S., Dubrovsky J. G., y Shishkova S. 2018. Transcriptomics insights into the genetic regulation of root apical meristem exhaustion and determinate primary root growth in *Pachycereus pringlei* (Cactaceae). *Scientific Reports*, 8(1), 8529. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26897-1>
- Segura, S., Scheinvar L., Olalde G., Leblanc O., Filardo S., Muratalla A. y Flores C. 2007. Genome sizes and ploidy levels in Mexican cactus pear species *Opuntia* (Tourn.) Mill. series *Streptacanthae* Britton et Rose, *Leucotrichae* DC., *Heliabravoanae* Scheinvar and *Robustae* Britton et Rose. *Genetic resources and crop evolution*. 54, 1033–1041. <https://doi.org/10.1007/s10722-006-9196-z>.
- Sun, Y., Shang L., Zhu Q. H., Fan L. y Guo L. 2022. Twenty years of plant genome sequencing: achievements and challenges. *Trends in Plant Science*. 27(4), 391–401. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.10.006>.
- Torres da Silva, R., Nollé F., Cordeiro dos Santos D., Felix L. P., Buril M. T. y Alcantara-Bruno R. 2023. Heterochromatin and polyploidy in *Opuntia* Mill. (Cactaceae: Opuntioideae): implications for plant breeding. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 51:4, 527–546. <https://doi.org/10.1080/01140671.2022.2028861>.
- Torres-Silva, G., Correia L. N. F., Batista D. S., Koehler A. D., Resende S. V., Romanel E., Cassol D., Almeida A. M. R., Strickler S. R., Specht C. D., y Otoni W. C. 2021. Transcriptome analysis of *Melocactus glaucescens* (Cactaceae) reveals metabolic changes during in vitro shoot organogenesis induction. *Frontiers in Plant Science*, 12, 697556. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697556>
- Valadez-Moctezuma, E., Samah S., Mascorro-Gallardo J. O., Marbán-Mendoza N., Aranda-Orsorio G., Flores-Girón E., Brito-Nájera G., y Rodríguez de la O J. L. 2023. The first transcriptomic analyses of fruits and cladodes for comparison between three species of *Opuntia*. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 70(3), 951–970. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01480-w>
- Wang, H.-L. V., y Chekanova J. A. 2019. An overview of methodologies in studying lncRNAs in the high-throughput era: when acronyms ATTACK! *Methods in*

- molecular biology (Clifton, N.J.), 1933, 1–30. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9045-0_1
- Werck, D., Bak S. y Paquette S. 2002. Cytochromes P450. The Arabidopsis book / American Society of Plant Biologists, 1, e0028. <https://doi.org/10.1199/tab.0028>
- Xiong, R., Liu C., Xu M., Wei S., Huang J. y Tang H. 2020. Transcriptomic analysis of flower induction for long-day pitaya by supplementary lighting in short-day winter season. BMC Genomics, 21, 329. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-6726-6>
- Yang, D., Du X., Yang Z., Liang Z., Guo Z. y Liu, Y. (2014). Transcriptomics, proteomics, and metabolomics to reveal mechanisms underlying plant secondary metabolism. Engineering in Life Sciences, 14(5), 456–466. <https://doi.org/10.1002/elsc.201300075>
- Zhang, X., Wang Q., Yang S., Lin S., Bao M., Bendahmane M., Wu Q., Wang C., y Fu X. 2018. Identification and Characterization of the MADS-Box Genes and Their Contribution to Flower Organ in Carnation (*Dianthus caryophyllus* L.). Genes, 9(4), 193. <https://doi.org/10.3390/genes9040193>
- Zhang, Z., Xing Y., Ramakrishnan M., Chen C., Xie F., Hua Q., Chen J., Zhang R., Zhao J., Hu G., y Qin Y. 2022. Transcriptomics-based identification and characterization of genes related to sugar metabolism in ‘Hongshuijing’ pitaya. Horticultural Plant Journal, 8(4), 450–460. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.06.004>

Sección: Herramientas bioquímicas y moleculares en el nopal.



5. ESTIMACIÓN DE LA DIVERSIDAD GENÉTICA DE O PUNTIA SPP. USANDO MARCADORES MOLECULARES TIPO RAPD Y AFLP

¹García Zambrano E. A.

¹Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. (UANL), Francisco I. Madero S/N, Ex Hacienda el Cañada, 66050 Cdad. Gral. Escobedo, N.L. México.

ORCID: 0000-0002-9617-3912,

eduardo.garciazb@uanl.edu.mx

Tema	Página
I Resumen.	89
II Introducción.	90
III Fundamentos para el análisis genético.	90
3.1 Técnica de extracción de DNA.	90
3.2 Generación de marcadores moleculares.	91
IV RAPD (Aplicación Aleatoria de DNA Polimorfico).	91
4.1 Generación de RAPD en nopal.	92
4.2 Análisis de datos moleculares.	93
4.3 Generación de datos moleculares.	93
4.4 Análisis de datos moleculares por el método de UPGMA.	94
4.5 Análisis de datos fenotípicos por el método Ward.	95
4.6 Incremento de la diversidad genética del banco de germoplasma de nopal usando marcadores moleculares tipo RAPD.	95
4.7 Análisis datos moleculares para el método de UPGMA.	96
V AFLP (Poliformismo en la Longitud de Fragmento Amplificado).	99
5.1 Generación de AFLP en nopal y xoconostle.	99
5.2 Generación de marcadores moleculares AFLP para nopal y xoconostle.	99
5.3 AFLP en nopal.	100
5.4 AFLP con varias combinaciones de iniciadores marcando con IRD y e700.	101
5.5 AFLP en xoconostle.	102
5.6 Análisis de datos moleculares por me método de UPGMA.	102
5.7 PCR-AFLP y RAPD para la estimación de la diversidad genética en nopal y xoconostle.	104
VI Literatura citada.	105
VII Anexos.	108

I. Resumen

La identificación de variedades se ha basado tradicionalmente en la descripción de los caracteres observables de las plantas, sin embargo, esta descripción es necesariamente lenta, debido al gran número de caracteres que hay que observar y a la necesidad de hacerlo en unas condiciones controladas para minimizar la variabilidad natural. Esto ha llevado a que en numerosas ocasiones existan genotipos mal

indexados, especialmente cuando se trata de cultivares que presentan fenotipos muy similares. Por lo anterior, en este Capítulo se explican dos técnicas para coadyuvar al estudio de la diversidad del nopal como lo son: los AFLPs y RAPDs.

II. Introducción

Las tecnologías basadas en marcadores moleculares de DNA son el medio más avanzado y posiblemente el más eficaz y exacto para identificar variación genética de forma rápida y minuciosa, siendo un gran adelanto el desarrollo de los marcadores moleculares (Cenis JL, 2000). Los marcadores moleculares basados en el DNA poseen características ventajosas puesto que sus resultados no son afectados por el ambiente y están disponibles en un número casi ilimitado, abundante y aplicable a todos los organismos. Con los marcadores moleculares se reconoce directamente las diferencias genéticas entre individuos, obteniéndose un "perfil molecular" o "fingerprinting" característico para cada variedad e independiente de las condiciones de crecimiento de las plantas (Morell et al., 1995). Además, permiten obtener mejores estimaciones de la diversidad genética de una población determinada (Johns et al., 1997), así como información sobre frecuencias alélicas, nivel de heterocigocidad de una población y subdivisión de poblaciones, entre otras, en un período de tiempo menor al ocupado mediante estrategias convencionales (Waugh y Powell, 1992).

III. Fundamento para el análisis genético

3.1 Técnica de extracción de DNA

El aislamiento del DNA cactáceo es notoriamente difícil por contener altas cantidades de polisacáridos y metabolitos secundarios cuya forma insoluble complica la extracción (Maréchal Drouard et al., 1995). Los polisacáridos son visualmente evidentes por su viscosidad, siendo una textura pegajosa que hace que el DNA sea inmanejable en los tubos y difícil de amplificar en la reacción en cadena de la polimerasa (Porebski et al., 1997).

Existen varios métodos para extraer DNA en nopal, uno de los cuales es el protocolo modificado del método de fraccionamiento subcelular (Saldaña A, 1998), al cual se le añadió un doble lavado con fenol cloroformo para reducir cantidad de polisacáridos, facilitando el manejo de las muestras y la generación de los primeros marcadores moleculares tipo RAPD debido a que este tipo de marcador molecular no es muy exigente en la calidad y cantidad del DNA.

Al probar este protocolo se obtiene una mayor concentración de DNA, cuando se usaron cladodios jóvenes validando este resultado el cuantificar el rendimiento y pureza de DNA, donde se registró la absorbancia en dos longitudes de onda (260nm/28nm). Las preparaciones puras de DNA tienen valores que van desde los 1.8 a 2 a dichas absorbancias, respectivamente. Los resultados obtenidos al utilizar el protocolo modificado de fraccionamiento subcelular son que la gran mayoría de las muestras registraron valores fuera de este rango, por la contaminación de proteínas o fenoles presentes en las muestras (García et al., 2006)

Debido a lo anterior se buscó disminuir los contaminantes en las muestras de nopal y

se realizó la extracción de DNA por el método del ruptor celular con el kit FastDNA® (Qbiogene, Inc., C.A.). Se observó que las concentraciones de DNA fueron mayores cuando se utilizaron cladodios jóvenes, obteniendo valores de 74,91 ng/μL en la accesión Verdura Santa Rosa. Sin embargo, también se obtuvieron valores bajos de 12,32 ng/μL como en la accesión Tuna Morada-Cáscara Roja, a pesar de utilizar un cladodio joven para la extracción. Esto podría estar relacionado con la rápida oxidación que presentó la muestra (Vargas et al., 2016).

3.2 Generación de Marcadores Moleculares

Existen dos clases de marcadores genéticos: los morfológicos y los moleculares (Tanksley 1983). En primer orden, la caracterización e identificación tradicional de variedades se ha basado en el empleo de caracteres morfológicos y/o agronómicos (Rallo et al. 2002). No obstante, el uso de marcadores morfológicos en las plantas tiene muchas limitantes, pues su expresión puede estar sujeta a factores ambientales o fenológicos; por ejemplo, la presencia o ausencia de espinas en las cactáceas. Con frecuencia estos marcadores solo es posible evaluarlos a nivel de toda la planta y cuando esta llega a su estado adulto. Para la gran mayoría esto significa una espera, no deseable, de varios años. Además, pueden ocurrir cambios epigenéticos que limitan el número de marcadores que pueden ser evaluados sin equivocación en la población segregante (Powell 1992). Por otro lado, gracias a los avances en la biología molecular se han desarrollado métodos de identificación y caracterización basados en el uso de marcadores moleculares que superan, en la gran mayoría de los casos, las limitaciones de los métodos tradicionales.

IV. RAPD (Amplificación Aleatoria de DNA polimórficos)

Este análisis fue descrito por primera vez en 1990 por dos grupos de investigadores independientes Williams et al. (1990) y Welsh y McClelland (1990). Phillips et al. (1995) mencionan que en esencia es la misma metodología PCR, por lo que a veces se le refiere con este nombre. La modificación que les dio origen consistió en sustituir en la tecnología PCR, el uso de un par de iniciadores cuidadosamente diseñados y un poco largos, por un solo iniciador corto, de alrededor de 10 nucleótidos de longitud y de secuencia arbitraria, con la capacidad de unir se extiende a regiones específicas en el genoma (Waugh y Powell 1992). En el análisis PCR los dos iniciadores son usados para amplificar una secuencia específica del genoma, y en el análisis RAPD, el iniciador se usa para amplificar secuencias al azar de un patrón complejo de DNA. Los polimorfismos producidos con la técnica RAPD se denominan marcadores RAPD, y pueden resultar de cualquier cambio en la secuencia o sitio de unión del iniciador (mutación puntual), lo cual impide que el iniciador se una a la cadena, o también pueden ser el producto de cambios que alteren el tamaño o impidan la exitosa amplificación del DNA molde. Como regla general, el tamaño de las variantes se detecta muy escasamente y los productos de amplificación individuales representan un alelo por locus. En los estudios de herencia, los productos de amplificación se comportan como marcadores dominantes (Waugh y Powell 1992). Los RAPDs generan un número inmenso de marcadores y, al contrario de los RFLPs, no requieren de sondas específicas para cada especie y la cantidad de DNA necesaria para el análisis es mucho menor (Phillips et al., 1995). Williams et al., (1993) señala

que este es un método para crear impresión digital genómica a partir de especies en las cuales no se conoce la secuencia que se va a amplificar. Para lograr la amplificación de DNA de nopal con la técnica de RAPD se siguió como base el protocolo de Williams et al., (1993), estandarizado y optimizado para las condiciones del laboratorio.

4.1 Generación de RAPD en Nopal.

En la última década del siglo XX se utilizó por primera vez esta técnica en nopal, con la finalidad de estimar la diversidad genética de 100 accesiones del Banco de Germoplasma de Nopal ubicado en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Anexo 1), cuyas accesiones fueron donadas por el Banco de Germoplasma del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma de Chapingo, en el Estado de Zacatecas (Anexo 2), dentro de la localidad denominada “Huertas El Orito”. Las accesiones fueron colectadas de acuerdo con el protocolo establecido en el Anexo 3

Para la generación de RAPD en nopal se siguió como base el protocolo de Williams et al. (1990). Las reacciones de amplificación se llevaron a cabo utilizando los 12 iniciadores (Cuadro 1) que dieron origen a 20 marcadores moleculares registrados en el Banco de Germoplasma de Nopal, señalados por García et al. (2006)

Cuadro 1. Iniciadores utilizados para la estimación de diversidad genética.

Iniciador	Secuencia Nucleotídica	Concentración (nmoles)
A - 07	GAAACGGGTG	50
A - 08	GTGACGTAGG	50
A - 09	GGGTAACGCC	50
A - 11	CAATCGCCGT	50
G - 02	GGCACTGAGG	50
G - 03	GAGCCCTCCA	50
G - 04	AGCGTGTCTG	50
G - 05	CTGAGACGGA	50
G - 07	GAACCTGCGG	50
G - 08	TCACGTCCAC	50
G - 18	GGCTCATGTG	50
G - 19	GTCAGGGCAA	50

Es importante señalar que se realizó una rigurosa pre-selección de iniciadores para RAPD utilizando en las pruebas preliminares los grupos de iniciadores OPA (1-20) y OPG (1-20) de Operon Technologies (Alameda, CA, USA), identificando 12 iniciadores, los cuales generaron productos de amplificación (RAPD) con un subconjunto de 10 accesiones dentro de las 100 accesiones que forman el banco. Se produjeron 20 loci polimórficos bien definidos, observando que tanto el grupo de iniciadores OPA y OPG presentaron buenos resultados, como el OPA-07 y OPG-03, los cuales presentaron un 86 y 90% productos de amplificación respectivamente con respecto a las 100 accesiones estudiadas. En cambio, los iniciadores OPG-04 y OPG-07 fueron los que menos amplificaciones presentaron, ya que solo generaron banda

con un 16 y 14 % de las accesiones respectivamente. Cuando se usó el iniciador OPA-07 se observaron bandas muy definidas, aunque el OPA-08, OPA-09, OPA-11 amplificaron para la mayoría de las muestras.

4.2 Generación de datos moleculares.

Los resultados obtenidos de los 12 iniciadores, generaron 20 marcadores moleculares A-07(300 pb), A-08 (314 pb), A-08 (400 pb), A-09 (700 pb), A-11 (300 pb), A-11 (500 pb), G-02 (450 pb), G-03 (500 pb), G-04 (300 pb), G-04 (635 pb), G-05 (600 pb), G-07 (550 pb), G-08 (300 pb), G-08 (465 pb), G-08 (500 pb), G-18 (700 pb), G-19 (300 pb), G-19 (500 pb), G-19 (730 pb), G-19 (965 pb). Se obtuvieron de 1 a 5 bandas por iniciador con un peso molecular que fluctuó entre los 200 a 1000 pb (Figura 1). El índice de diversidad (ID) promedio obtenido en nopal es de 0.8307 en comparación con los obtenidos en agave 0.578 para RAPD y los valores ya reportados en papa (0.326) (Milbourne et al., 1997) y en cebada (0.521). Se observó valores altos debido a que el análisis se realizó en el banco de germoplasma donde la variabilidad genética entre las accesiones es alta, lo que lo hace diferente a los reportados previamente en donde en agave se analizaron 54 individuos y en los demás cultivos señalados se analizaron cultivares dentro de la misma especie o individuos pertenecientes a dos especies.

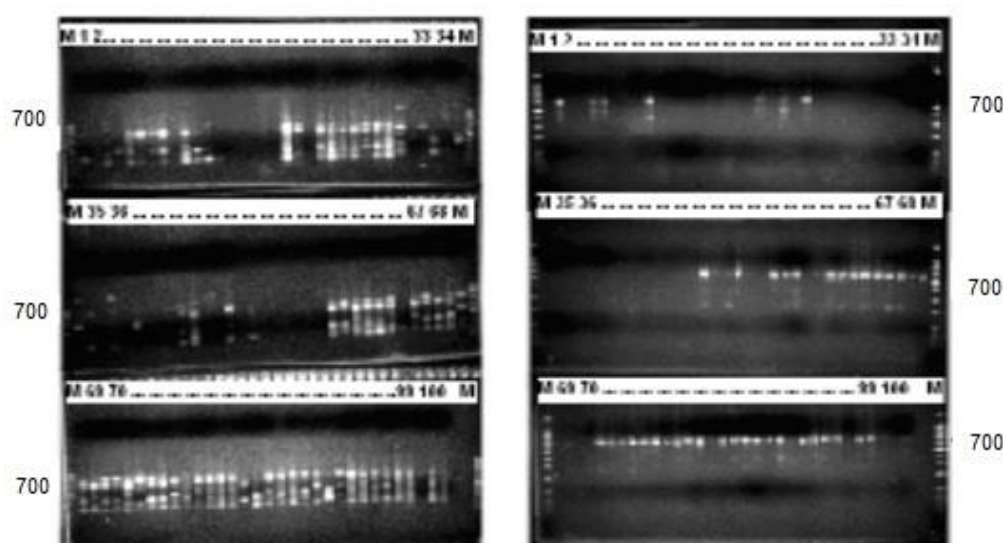


Figura 1. Productos amplificados por el iniciador OPG-18 y OPA-09. (M = marcador 100 pb, 1-100 DNA de las accesiones de nopal).

4.3 Análisis de datos moleculares.

Para la estimación de la diversidad genética de *Opuntia* se usó los análisis conglomerados (“cluster analysis”) o “agglomerative hierarchical cluster analysis” (Luna et al., 2007). Se ha demostrado que dicho método es tan robusto para la reconstrucción de relaciones filogenéticas jerárquicas como los métodos cladísticos (James y McCulloch, 1990). Los fragmentos de DNA amplificados bien definidos (bandas) obtenidos con los iniciadores, se analizaron visualmente para generar una matriz de datos binaria (0 y 1) donde “0” representa la ausencia de la banda y “1”

representa la presencia de la banda (Bramardi, 2002). Con la matriz de datos binaria se construyó la matriz de distancias genéticas mediante la comparación de cada par de genotipos utilizando el método de Nei y Li (1979). Las accesiones fueron evaluadas a nivel fenotípico y molecular, utilizando el análisis de conglomerados y los resultados se observan en los dendrogramas generados con distintas técnicas de agrupamiento.

4.4 Análisis de datos moleculares por el método UPGMA.

En el dendrograma de la Figura 2 obtenido al usar el método de UPGMA, se observa que los grupos se forman a una menor distancia comparada con el método de Ward, en un rango de 0 a 2.7 unidades. En la matriz de datos moleculares se estimaron las distancias genéticas mediante la comparación de cada par de accesiones utilizando la fórmula de Nei y Li, (1979). Los valores de las distancias genéticas alcanzaron un rango de 0 a 0.75, tomando en consideración que los valores 0 pueden ser posibles accesiones duplicadas. Se analizaron las distancias para ver si las accesiones comparadas generaron bandas en la misma posición con los marcadores utilizados. Se observó que las accesiones Colorada T- 6, Octubreña, Fafayucan T-23, Amarillo 2289, Cardón Rojo, Octubreña T-39, Amarillo Aguado T, Sangre de Toro, Rojo 3589 T26 L, Chapeada, Alfajayucan T-16 y Pabellón T30L, mostraron una distancia euclidiana de 0, pero al cotejarlas con los datos fenotípicos se concluyó que no existía duplicidad, por lo cual la diversidad genética presente en el Banco es de un cien por ciento.

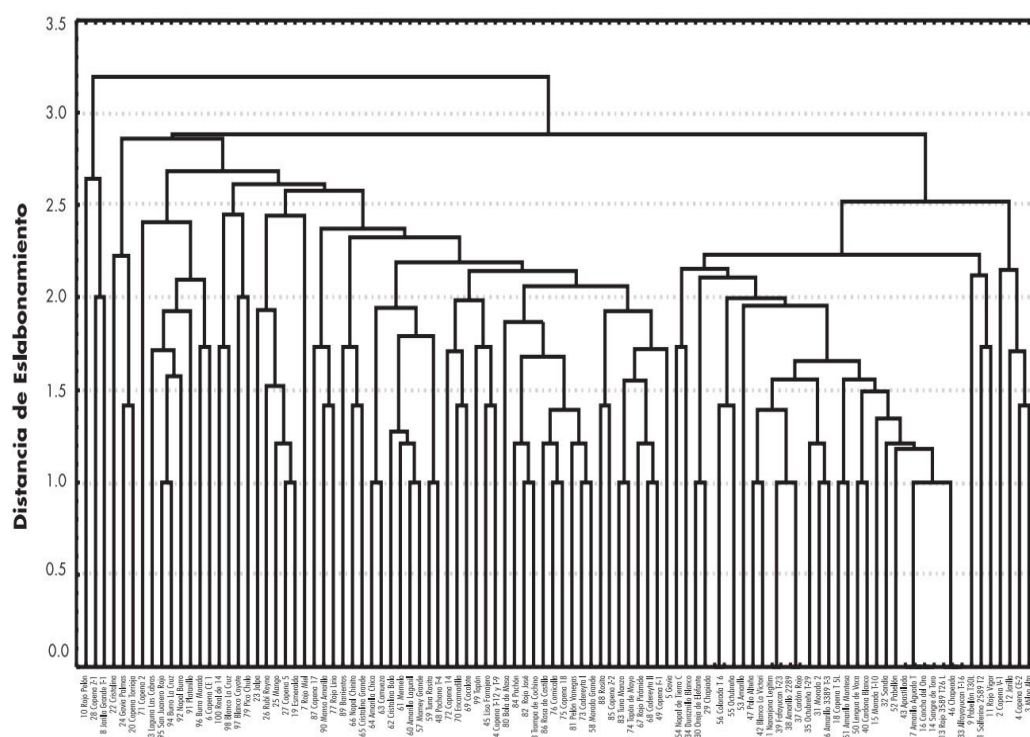


Figura 2. Dendrograma calculado a partir de datos moleculares de las 100 Accesiones del Banco de

4.5 Análisis de datos fenotípicos por medio del método de Ward.

Las variables utilizadas para el agrupamiento fueron cuantitativas (largo, ancho, y grosor de los cladodios, altura de planta y área de cobertura) debido a que las variables cualitativas presentaron una variabilidad mínima. El método de Ward generó un dendrograma donde se realizó el corte a una distancia euclidiana de 100, formándose dos grandes grupos. El grupo compuesto por 36 accesiones tiene como característica que el uso que se le da a cada accesión es específico, es decir que sólo se dedica ya sea a producir, fruta o verdura o forraje; en cambio las 64 accesiones que forman el segundo grupo se utilizan de forma múltiple, es decir que la misma accesión tiene más de un uso (Figura 3).

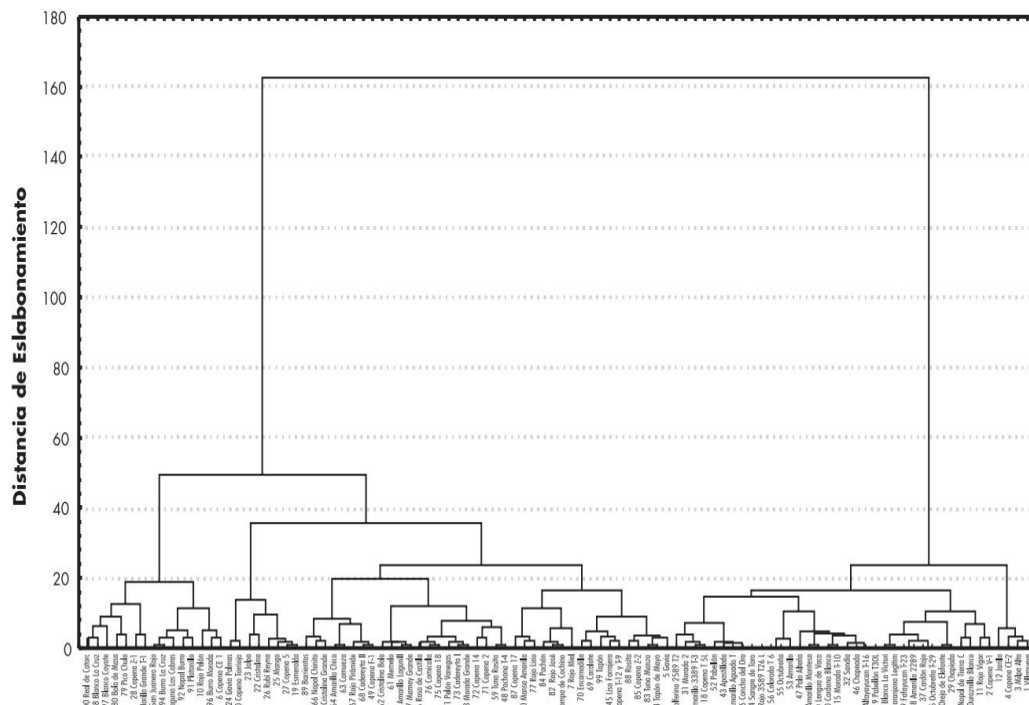


Figura 3. Dendrograma calculado a partir de datos moleculares de las 100 Accesiones del Banco de Germoplasma de Nopal FAUANL, usando el Método de Ward.

4.6 Incremento de la diversidad genética del banco de germoplasma de Nopal usando marcadores moleculares tipo RAPD

Con la base de datos moleculares generada en el Banco de Germoplasma de Nopal, Escalante et al., 2012, la utilizó para clasificar 15 accesiones colectadas, estimando su diversidad genética para incorporarlas en el Banco, 8 accesiones fueron colectadas en el municipio de Iturbide, localizado al sureste de Nuevo León, México, en la región denominada Sierra Madre Oriental (24° 43' 60''N, 99° 53' 60' 0, 1850 msnm) y las 7 accesiones restantes, fueron donadas por el Banco de Germoplasma del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma de Chapingo, en el

Estado de Zacatecas, dentro de la localidad denominada “Huertas El Orito”

Los iniciadores que rindieron mejores resultados de amplificación en las 15 accesiones analizadas fueron el A-11 y G-02 con un 100 y 80 %, respectivamente. Los iniciadores que presentaron menos amplificación fueron el A-08 y G-18 con un 13 y 40%, respectivamente. Se generaron diez marcadores que no se encontraron registrados en el banco de germoplasma A-07 (100 pb), A-07 (600 pb), A-09 (200 pb), A-02 (850 pb), G-04 (700 pb), G-04 (810 pb), G-05 (1000 pb), G-05 (800 pb), G-05 (700 pb), G-19 (410 pb)]. A estos se deben sumar los veinte marcadores generados por García et al. (2006), formando la base de datos moleculares del Banco.

El índice de diversidad (ID) promedio de las 15 accesiones de nopal fue de 0,8539, el cual es muy similar al reportado por García et al. (2006). Esta diferencia se debió a que el 46 % del material colectado de nopal fue del Banco de Germoplasma del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma de Chapingo, en el cual existe una alta variabilidad genética; el 54 % del material restante se colectó en nopaleras del municipio de Iturbide Nuevo León, México, buscando ejemplares distintos morfológicamente de los que cuenta el banco. Scheepers et al. (2000) sostienen que las críticas que comúnmente se hacen contra la técnica RAPD no son generalizables en cuanto a la reproducción de los resultados. Esto es debido a que en sus investigaciones ellos los han repetido utilizando diversos tejidos de las plantas, diferentes tipos de reactivos y diferentes equipos de PCR, obteniendo siempre los mismos resultados. En esta investigación, se realizaron pruebas de reproducibilidad, con las accesiones Roja Libertad y Chicle usando los iniciadores G-04, G-05, G-19 (Figura 4). Se hicieron 5 extracciones de DNA en cada muestra, las cuales se procesaron para la generación de RAPD con diferentes marcas de reactivos (Taq polimerasa®) obteniendo el 100% de reproducibilidad entre las accesiones, lo que valida la confiabilidad de la técnica y de los resultados.

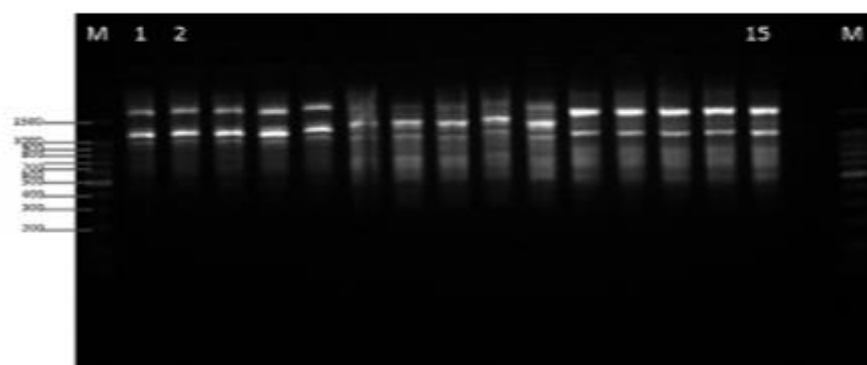


Figura 4 Productos amplificados por los iniciadores G-04 (carriles 1-5), G-05 (carriles 6-10) y G-19 (carriles 11-15) con la accesión14 Chicle. El marcador (M) de 100 pb se aprecia en los extremosdel gel de agarosa al 2%.

4.7 Análisis de datos moleculares por el método de UPGMA.

Para el análisis de los datos moleculares, se incorporaron los marcadores que se generaron de las 15 accesiones colectadas a la matriz binaria de las 100 accesiones

registradas en el banco, considerando los 20 marcadores moleculares reportados por García et al. (2006). El material colectado siguió un comportamiento similar a las 100 accesiones (Figura 5), formándose tres grupos en un rango de 0 a 8 unidades euclidianas, dentro de los cuales se produjo la incorporación del nuevo material dentro del primer grupo en dos subgrupos.

El primer grupo se encontró formado por 53 accesiones teniendo como característica cladodios ovalados y elípticos., Con la inclusión de los nuevos materiales se anexaron dos subgrupos formados por cuatro accesiones (Amarillo sin Espinas Iturbide, Amarillo P Blanca T Chico, Amarillo Chico Masozo y Tuna Morada-Cáscara Roja) y 11 accesiones (Rosa de Castilla, Amarillo con Espinas Santa Rosa, Chicle, Tapón Santa Rosa, Rojo Azteca, Mango, Duraznillo, Forrajero Aguascalientes, Roja Libertad, Verdura Santa Rosa y Blanco Zacatecas), que compartieron la misma característica del grupo. En el subgrupo de las cuatro accesiones se observó que las mismas fueron colectadas en el municipio de Iturbide N.L., y éstas se agruparon en forma consecutiva en el dendrograma: tres de ellas mostraron una distancia genética de cero; es posible que este material sea duplicado, es decir que sea el mismo tipo de nopal.

El segundo grupo se encontró compuesto por 59 accesiones, las cuales se usan para la producción de fruta y verdura. En lo que se refiere al tercer grupo se encontró compuesto por 3 accesiones, las cuales no comparten ninguna característica en común, por lo cual no se le dio ningún nombre específico.

Para poder determinar si las 3 accesiones que presentaron distancia genética 0 son duplicadas, se analizó por separado el material colectado utilizando 30 marcadores moleculares. De estos, 20 marcadores fueron los que usaron para realizar la estimación de la diversidad genética del banco y 10 marcadores se generaron del material colectado [A- 07 (100 pb), A-07 (600 pb), A-09 (200 pb), A-02 (850 pb), G-04 (700 pb), G-04 (810 pb), G-05 (1000 pb), G-05 (800 pb), G-05 (700 pb), G-19 (410 pb)].

Las 15 accesiones colectadas formaron dos grupos: uno con 8 accesiones, procedentes del municipio de Iturbide N. L., y el otro con 7 accesiones, las cuales provinieron del Banco de Germoplasma del CRUCEN-UACH en el Estado de Zacatecas (Figura 6).

Las accesiones tuvieron la producción de tuna como característica principal. Ninguna accesión tuvo distancia genética de cero en el dendrograma, por lo cual no existió duplicidad entre las accesiones colectadas. Se concluyó que existe un cien por ciento de diversidad genética en las accesiones colectadas, para incorporar en el Banco de Germoplasma.

V. AFLP (Polimorfismos en la Longitud de Fragmentos Amplificados)

Los polimorfismos en la longitud de fragmentos amplificados o AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism) fueron diseñados originalmente por Vos et al. en 1995, como un método altamente sensitivo para la generación de huellas genéticas que pueden ser utilizadas en una gran variedad de campos, incluyendo el mejoramiento genético de plantas y animales domésticos, la diagnosis médica, el análisis forense y la tipificación de microbios, sólo para nombrar algunos.

El poder de los AFLP está basado en las variaciones genéticas moleculares que existen entre especies, variedades o cultivares genéticamente cercanos. Estas variaciones en la secuencia del ADN son explotadas por los AFLP de tal manera que se generan huellas genéticas, las cuales pueden ser producidas en forma rutinaria y consistente. Estas huellas genéticas son simplemente AFLP, los cuales son visualizados gracias a que son amplificados selectivamente por PCR.

5.1 Generación de AFLP en nopal y xoconostle.

Los AFLP es una técnica basada en una combinación de digestión con enzimas de restricción y PCR con la habilidad para hacer un escrutinio de múltiples marcadores dentro de una sola muestra, detectando polimorfismos debido a los cambios en y alrededor de los sitios de restricción MseI y EcoRI.

Diferentes combinaciones de oligonucleótidos iniciadores +3 permiten la amplificación de diferentes subgrupos de los productos de amplificación inicial e incrementan la probabilidad de encontrar polimorfismos útiles. Se generaron marcadores moleculares de tipo AFLP como herramienta para la diferenciación molecular de 36 accesiones de xoconostle colectados en el Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma de Chapingo (CRUCEN-UACH.).

5.2 AFLP en Nopal

Se trabajó con 12 accesiones de nopal (Pabellón, Octubreña T-39, Sangre de Toro, Rojo 3589 T26 L, Amarillo 2289 T 32 L, Colorada T6, Octubreña, Fafayucan T-23, Cardón Rojo, Concha de Oro, Liso Forrajero y Pabellón T30), las cuales fueron reportadas con una distancia genética de cero dentro del Banco de Germoplasma de Nopal (García et al., 2009).

Con todos los iniciadores se obtuvieron productos de amplificación. En promedio se observaron fragmentos cuyo peso osciló entre los 500 y 50 pb (Figura 7). Los fragmentos producidos son potencialmente polimórficos, observándose una mayor cantidad de bandas cuando se utilizaron los iniciadores marcados con IRDye 700.

5.3 Generación de marcadores moleculares AFLP para nopal y xoconostle

Se corrieron un gel por muestra analizada colocando al inicio y al final del gel un marcador molecular de 700 pb. (50, 100, 145, 200, 204, 255, 300, 350, 364, 400, 460, 495, 500, 530, 565, 600, 650, 700 pb) y entre ellos las 32 combinaciones usadas en la amplificación selectiva (Cuadro 2), las cuales todas produjeron fragmentos de amplificación AFLP.

Cuadro 2. Combinaciones para la generación de la amplificación selectiva.

Combinación	primer de MseI	primer EcoRI
1	M-CAA	E-AAC
2	M-CTA	E-ACA
3	M-CAG	E-AAG
4	M-CTG	E-ACC
5	M-CTT	EACA
6	M-CAA	E-AAG
7	M-CAA	E-ACA
8	M-CAA	E-ACC
9	M-CAC	E-AAC
10	M-CAC	E-AAG
11	M-CAC	E-ACA
12	M-CAC	E-ACC
13	M-CAG	E-AAC
14	M-CAG	E-ACA
15	M-CAG	E-ACC
16	M-CAT	E-AAC
17	M-CAT	E-AAG
18	M-CAT	E-ACA
19	M-CAT	E-ACC
20	M-CTA	E-AAC
21	M-CTA	E-AAG
22	M-CTA	E-ACC
23	M-CTC	E-AAC
24	M-CTC	E-AAG
25	M-CTC	E-ACA
26	M-CTC	E-ACC
27	M-CTG	E-AAC
28	M-CTG	E-AAG
29	M-CTG	E-ACA
30	M-CTT	E-AAC
31	M-CTT	E-AAG
32	M-CTT	E-ACC

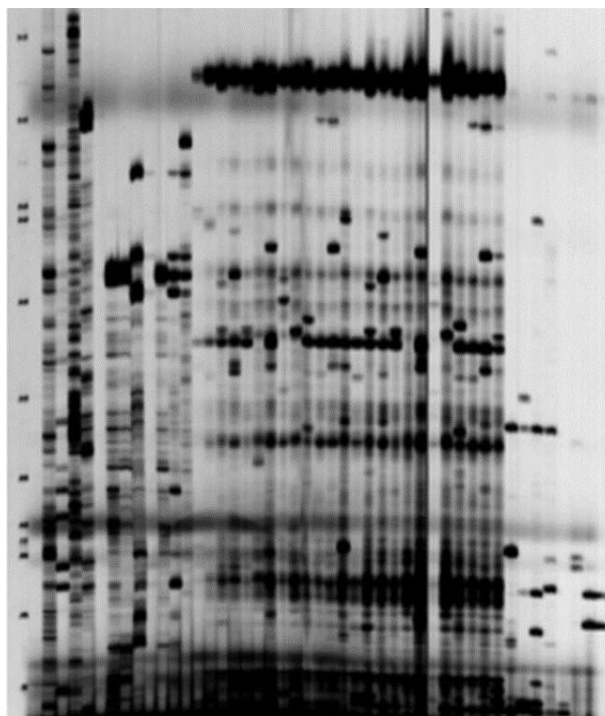


Figura 7. Productos de amplificación de las 12 accesiones de nopal por medio de la técnica de AFLP, con la combinación de iniciador marcado con IRDye 700.

Con todos los iniciadores se obtuvieron productos de amplificación. En promedio se observaron fragmentos cuyo peso osciló entre los 500 y 50 pb (Figura 7). Los fragmentos producidos son potencialmente polimórficos, observándose una mayor cantidad de bandas cuando se utilizaron los iniciadores marcados con IRDye 700.

5.4 AFLP con varias combinaciones de iniciadores marcado con IRDye 700

En el dendrograma de la Figura 8, obtenido al usar el método de UPGMA, se observó que ninguna accesión presentó una distancia de eslabonamiento de cero. Esto indica que los valores se encuentran entre un rango de 0,3 a 0,78 al calcular la distancia genética. Por lo tanto no existe duplicidad entre las accesiones estudiadas.

Se formaron ocho grupos a la mitad de la máxima distancia de eslabonamiento (Cenis, 2000), 6 de los cuales presentaron una accesión (Pabellón, Octubreña T-39, Sangre de Toro, Rojo 3589 T26 L, Amarillo 2289 T 32 L, y Colorada T6). Se formaron otros 2 grupos con 3 accesiones cada uno (Octubreña, Fafayucan T-23 y Cardón Rojo, así como Concha de Oro y Liso Forrajero y Pabellón T30).

Al analizar estas plantas fenotípicamente, se observó que no existe ningún carácter fenotípico que nos pueda marcar similitudes notables (Pimienta, 1994) que justifiquen un agrupamiento a una distancia de eslabonamiento de 2,9. Se puede decir entonces que el agrupamiento de las accesiones se podría deber a algún carácter no expresado fenotípicamente. Sin embargo, es claro que estas accesiones no son duplicadas.

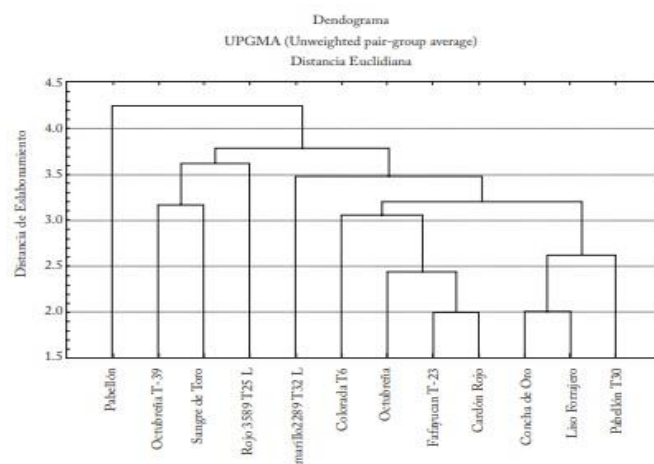


Figura 8. Dendrograma generado con las 12 accesiones a partir de marcadores AFLP estimando similitud genética según el coeficiente de Nei y Li (1979), utilizando como método de agrupamiento el de la media aritmética no ponderada (UPGMA).

5.5 AFLP en Xoconostle

Las amplificaciones generadas por cada combinación, en donde la combinación 31 (M-TT E-AAG) presentan el valor más bajo con 9 bandas y la combinación 9 (M-CAC E-AAC) presenta el valor mayor con 464 bandas. El total de bandas generadas por las 32 combinaciones en las 36 accesiones fue de 4,506 (García et al., 2018)

5.6 Análisis de Datos Moleculares por el Método de UPGMA.

Para el análisis de las accesiones de xoconostle, se formó la matriz de datos binarias, corriendo las accesiones para cada combinación que obtuvo mayor cantidad de bandeo (Figura 9).

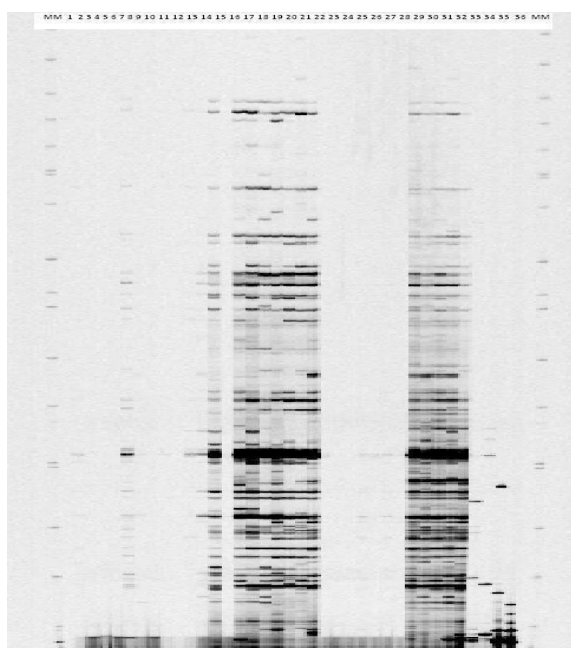


Figura 9. Productos de amplificación de las 36 accesiones de Xoconostle, por medio de la

técnica de AFLP con la combinación de iniciador marcado con IRDye 800.

Siendo las combinaciones: 1, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 25, 29 que dieron más productos de amplificación, a partir de las cuales se seleccionaron bandas con igual peso en la mayoría de las accesiones, de las cuales para la elección de un marcador molecular fue la definición de la banda, si estas se presentaron tenues o poco definidas se eliminaron; por tal motivo, de las amplificaciones generadas se tomaron 295 marcadores moleculares con un peso molecular que fluctuó entre los 50 a 800 pb. El índice de diversidad (ID) promedio de las 36 accesiones fue de 0.8124.

La matriz binaria se analizó a través de conglomerados por el método de agrupación de pares no ponderada (UPGMA). En el dendograma (Figura 10) se realizó un corte a una distancia euclidiana de 11, generándose dos grupos de 5 y 31 accesiones. El último grupo se divide en dos subgrupos integrados por 8 y 23 accesiones respectivamente. Las accesiones Orito Xoconostle 14, Orito Xoconostle 16 presentan una distancia genética cero, siendo estas consideradas duplicadas, por lo cual, se deberá establecer solo una de ellas dentro del banco.

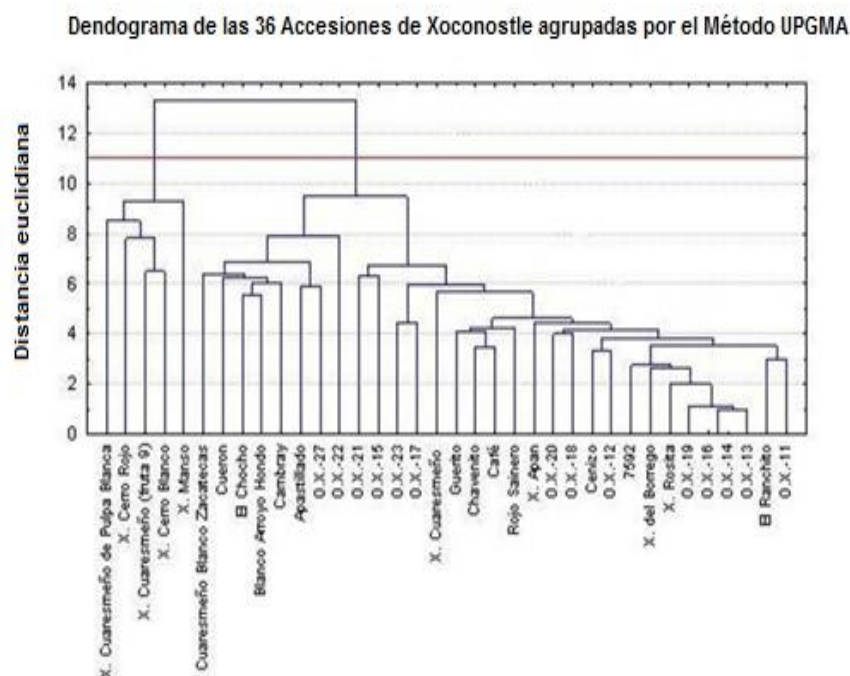


Figura 10. Dendrograma generado con las 36 accesiones a partir de 259 marcadores AFLP estimando similitud genética según el coeficiente de Nei y Li (1979), utilizando como método de agrupamiento el de la media aritmética no ponderada (UPGMA).

5.7 PCR-AFLP y RAPD para la estimación de la diversidad genética en nopal y xoconostle

Se han desarrollado métodos basados en la amplificación de secuencias genómicas mediante una reacción de amplificación en cadena (PCR, Polymerase Chain Reaction). Con esta aproximación, se realiza un análisis con una pequeña cantidad de DNA y con protocolos comparativamente sencillos, de los cuales existen numerosas variantes descritas en forma genérica por Staub et al. (1996). En el género *Opuntia* se usaron dos de estos métodos: la amplificación de fragmentos usando iniciadores de diseño aleatorio (RAPD, Random Amplified Polymorphic DNA) (Williams et al., 1990) y la amplificación de fragmentos genómicos digeridos por enzimas de restricción (AFLP, Amplified Fragment Length Polymorphism) (Vos et al., 1995).

Estas metodologías también son conocidas como marcadores "masivos", ya que permiten generar una gran cantidad de información en breve plazo, sin requerir del conocimiento previo de las secuencias genómicas amplificadas. Ambos recurren al uso de iniciadores de diseño aleatorio, de manera que reconocen secuencias "anónimas", dispersas a lo largo de todo el genoma.

El método de RAPD ha sido descrito en detalle por numerosos autores (Williams et al., 1990). RAPD difiere de otros métodos de análisis por PCR en que se usa un único iniciador de pequeño tamaño y se hace el apareamiento del PCR a bajas temperaturas. Las ventajas del método son su simplicidad y bajo costo, aunque tiene el inconveniente de ser un marcador de tipo dominante, es decir, no es posible discernir sobre la heterocigosidad de los loci observados. Además, la reacción es muy sensible a las condiciones de amplificación y a la calidad y concentración del DNA, las cuales influirían en la reproducibilidad del método.

El análisis por AFLP (Vos et al., 1995), que es esencialmente la combinación de una digestión con enzimas de restricción y de amplificación por PCR, presenta un grado de reproducibilidad mucho mayor. AFLP, por su parte, también es un marcador de tipo dominante y su nivel de complejidad técnica es más alto que RAPD, lo que representa una desventaja. De esta manera, en cada especie o grupo de especies en estudio, es necesario hacer un análisis comparativo antes de decidir qué metodología usar para resolver un determinado problema de análisis genético.

Aunque algunos autores han mostrado reservas respecto de la utilidad de RAPD para realizar estudios genéticos en nopal, básicamente por su escasa reproducibilidad, existen antecedentes que sugieren que esta metodología podría usarse para este fin.

Los AFLP aparecen como una nueva estrategia para la generación de marcadores moleculares de forma sencilla, rápida y confiable. Por ello se ha convertido en la herramienta molecular más adecuada para establecer la huella génica de cualquier origen o complejidad, analizando simultáneamente muchos loci y detectando un mayor número de marcadores de DNA polimórfico que cualquier otro medio basado en la PCR, detectando los cambios de tamaño de las distintas regiones o loci en el genoma y no se requiere conocer la secuencia de éste. Debido a que estos marcadores se generan en condiciones de alta selectividad (astringencia) es menos probable que se presenten falsos positivos, como los generados frecuentemente por RAPD-PCR.

VI. Literatura citada

- Bravo, H. 1978. Las cactáceas de México. Universidad Autónoma de México. México, D.F.
- 743
- Bramardi, S. 2002. Análisis multivariado. Su aplicación en la caracterización de recursos genéticos. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Comahue, Estación Exp. INTA, Argentina. p. 60.
- Cenis, J. L. 2000. Nuevas técnicas moleculares para la identificación varietal de plantas. CIDA La Alberca Murcia. 40, www.terralia.com/revista12/pagina40.htm.
- Chong, L. K., Tan S. G., Yusoff K. y Siraj S. S. 2000. Identification and characterization of Malaysian River catfish, *Mystus nemurus* (C&V): RAPD and AFLP analysis. *Biochem. Genet.* 38: 63-76.
- Escalante-González, J. G., García-Zambrano, E. A., Gutiérrez-Diez A. Ojeda-Zacarías M. C., Gallegos-Vázquez C. y García-Zambrano J. I. 2012. Incremento de la diversidad genética del banco de germoplasma de Nopal usando marcadores moleculares tipo RAPD. *Phyton, Revista Internacional de Botánica Experimental* 81:4-11.
- García, E., Gutiérrez A., Salinas G., Cárdenas E., Vázquez R., Zavala F. y Martínez J. 2006. Clasificación y estimación de la diversidad genética de Nopal *Opuntia* spp. en base a descriptores fenotípicos y marcadores genéticos moleculares. *Phyton, Revista Internacional de Botánica Experimental* 75: 125-135.
- García, E., Gutiérrez A., Ojeda Zacarías M. C., Zavala F. y Cerda I. 2009. Estimación de la diversidad genética del Nopal, usando marcadores moleculares tipo AFLP. *Phyton, Revista Internacional de Botánica Experimental* 78: 4-11.
- García, E., Ojeda Zacarías M. C. Gutiérrez J., Gutiérrez A., García S. y García I. 2018. Molecular differentiation of *Xoconostle* (*Opuntia* spp.) using AFLP molecular markers. *Phyton, Revista Internacional de Botánica Experimental* 87: 87-93.
- Granados S, D A Castañeda P. 1996. El nopal, Ed. Trillas, México.
- Helentjaris, T.; King, G.; Slocum. M.; Siedenstrang, C. y Wegman, S. 1985. Restriction fragment length polymorphisms as probes for plant diversity and their development as tools for applied plant breeding. *Plant Mol. Biol.* 5: 109-118.
- James, F. C. y E McCulloch. 1990. Multivariate analysis in ecology and systematic: Panacea or Pandora's box. *Annual Rev Ecol Syst* 21,129.
- Johns, M.A., Skroch P., Nienhuis, J. Hinrichsen P., Bascur G. y Muñoz C. 1997. Gene pool classification of common bean landraces from Chile based on RAPD and morphological data. *Crop Science* 37: 605-613.
- Luna, P., Valadez E., Barrientos A. y Gallegos C. 2007. Caracterización de *Opuntia* spp. mediante semilla con Marcadores RAPD e ISSR y su Posible Uso para Diferenciación. 44 p.
- Maréchal-Drouard, L. y Guillemaut P. 1995. A powerful but simple technique to

- prepare polysaccharide-free DNA quickly and without phenol extraction. *Plant Molecular Biology Reporter* 13 26.
- Milbourne, D., Meyer R., Bradshaw J. E. y Baird E. 1997. Comparison of PCR-based marker systems for the analysis of genetic relationships in cultivated potato. *Molecular Breeding* 3: 127–136.
- Moen, T., Hoyheim B., Munck H. y Gómez-Raya L. 2004. A linkage map of Atlantic salmon (*Salmo salar*) reveals an uncommonly large difference in recombination rate between the sexes. *Anim. Genet.* 35: 81-92.
- Morell, M. K.; Peakall, R., Appels R., Preston L. R. y Lloyd, H. L. 1995. DNA profiling techniques for plant variety identification. *Aust. J. Exp. Agric.* 35:807-819.
- Nei, M. y Li W. H. 1979. Mathematical model for studying genetic variation in terms of restriction endonucleases. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA* 76: 5269-5273.
- Phillips, W., Rodríguez H. y Fritz P. 1995. Marcadores de ADN: Teoría, aplicaciones y protocolos de trabajo con ejemplos de investigaciones en cacao (*Theobroma cacao*). Serie técnica. Informe técnico # 252. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 183 p
- Porebski, S. L., Bailey G. y Baum R. B. 1997. Modification of a CTAB DNA extraction protocol for plants containing high polysaccharide and polyphenol components. *Plant Mol Biol Reports* 12-8.
- Powell, W. 1992. Plant genomes, gene markers, and linkage maps. In: Moss, J. P. ed. *Biotechnology and crop improvement in Asia*. Patancheru, India. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. p. 297-322.
- Rallo, P., Belaj A., de la Rosa R. y Trujillo I. 2002. Marcadores moleculares (en línea). Córdoba, España. Consultado 1 ago. 2002. Disponible en http://www.extremadura21.com/caudal/hemeroteca/yo-junio_2000/almazara/almazara1.htm ma
- Saldaña-A J. M. 1998. Memorias del Congreso de la Soc. Mexicana de Fitogenética, Acapulco, México (378). Sambrook J, EF Fritsch, T Maniatis, *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*. Cold Spring Harbor, 78.
- Staub, J.E., Serquen F. C. y Gupta M. (1996). Genetic markers, map construction, and their application in plant breeding. *HortScience* 31:729-741[STANDARDIZEDENDPARAG]
- Scheepers, D., Eloy M. y Briquet M. 2000. Identification of larch species (*Larix deciduas*, *Larix kaempferi* and *Larix X eurolepsi*) and estimation of hybrid fraction in seed lots by RAPD finger- prints. *Theoretical and Applied Genetics* 100: 71-74.
- Tanksley, S. D. 1983. Molecular markers in plant breeding. *Plant Mol Biol Rep* 1, 3–8. Vargas-Rodríguez, L., Arroyo-Figueroa G., Herrera-Méndez, C. H., Pérez-Nieto, A.,
- García-Vieyra, M. I. y Rodríguez-Núñez, J. R. 2016. Propiedades físicas del mucílago de nopal. *Acta Universitaria*, 26, 8–11
- Vos P., Hogers, R., Bleeker M., Reinjans M., Van de Lee T., Hornes M., Frijters A.,

- Pot J., Peleman J., Kuiper M. y Zabeau M. 1995. AFLP: a new technique for DNA fingerprinting. *Nucleic Acids Res.* 23: 4407-4414.
- Waugh, R. y Powell W. 1992. Using RAPD markers for crop improvement. *Trends in Biotech.* 10: 186-191.
- Welsh J. y M. McClelland. 1990. Fingerprinting genomes using PCR with arbitrary primers. *Nucleic Acids Research*, Volume 18, Issue 24, 1 December 1990, Pages 7213–7218.
- Williams, J.G.K., Kubelik A., Livak K., Rafalski J. y Tingey S. 1990. DNA polymorphisms amplified by arbitrary primers are useful as genetic markers. *Nucleic Acids Research* 18: 6531-6535.
- Williams, C. E. y Clair D. 1993. Phenetic relationships and levels of variability detected by restriction fragment length polymorphism and random amplified polymorphic DNA analysis of cultivated and wild accessions of *Lycopersicon esculentum*. *Genome* 36 619.

VII. Anexos

Anexo 1 Fotografía satelital del Banco de Germoplasma de Nopal (*Opuntia spp.*) de la (FAUANL) en Marín, Nuevo León, México, ella se esquematiza por lotes el número de cultivares con los que cuenta el banco.



Anexo 2 Fotografía satelital del Banco de Germoplasma de Nopal (*Opuntia spp.*) del CRUCEN-UACH en la localidad denominada “Huertas del Orito”, Zacatecas, México. Es posible apreciar la distribución de las accesiones con las que cuenta el banco.



Anexo 3 Protocolo de colecta de las accesiones de nopal y xoconostle.

Pasos	Protocolo de colecta de nopal	Banco de germoplasma de nopal
1	Se colecta material donado por el Banco de Germoplasma del CRUCEN-UACH y en el Municipio de Iturbide Nuevo León.	
2	Selección de cladodios. En ellos se encuentran células en constante crecimiento, una mayor cantidad de ADN y un bajo contenido de mucilago.	
3	Corte de los cladodios. Se utiliza una navaja la cual es limpiada con alcohol al 70 % después de ser utilizada.	
4	Se toma el cladodio con guantes para evitar contaminación y protegerse de las espinas.	
5	La muestra es colocada en una bolsa de plástico de cierre hermético y depositada en una hielera.	
6	Las muestras se colocan en el congelador a una temperatura de -20 °C para su posterior uso en el protocolo de extracción de ADN.	

6. MANEJO POSCOSECHA DE TUNA Y NOPAL VERDURA

¹Barraza-Elenes, C; ¹Calderón-Castro, A; ²Gómez-Favela M.A.; ³Mondragón-Portocarrero, A.C. y ¹Carrillo-López A.

¹Posgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Facultad de Ciencias Químico-Biológicas. Universidad Autónoma de Sinaloa Culiacán. C.P. 80013.

²Facultad de Ciencias de la Nutrición y Gastronomía. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa México. C.P. 80019.

³Laboratorio de Higiene, Inspección y Control de Alimentos. Departamento de Química Analítica, Nutrición y Bromatología. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo España. 27002.

Correspondencia. CLA ORCID: [0000-0003-3541-8493](https://orcid.org/0000-0003-3541-8493), acarrill@uas.edu.mx.

Tema	Página
I. Resumen.	111
II. Introducción.	112
2.1 Importancia económica de tuna.	112
2.2 Características físicas y composición química de tuna.	112
2.3 Índices de madurez y atributos de calidad de tuna.	114
III. Fisiología y bioquímica postcosecha de tuna.	114
3.1 Daño por frío.	115
3.2 Desordenes patológicos.	115
3.3 Manejo postcosecha de tuna.	116
3.4 Prolongación de la vida postcosecha de la tuna.	118
IV. Nopal tipo aprovechamiento hortaliza.	119
4.1 Importancia económica de nopal verdura.	120
4.2 Características físicas y composición química del nopal verdura.	121
4.3 Manejo postcosecha de nopal verdura.	123
4.4 Almacenamiento.	123
V. Literatura citada.	123

I. Resumen

México es centro de origen de la planta del nopal pero actualmente se han establecido con éxito cultivos comerciales en varios países. Es un cultivo que, debido a su marcada resistencia a la sequía y rusticidad prospera en zonas áridas y semiáridas ubicadas en el centro y norte de México, donde la producción agrícola y pecuaria enfrentan severas restricciones debido a las condiciones climáticas e hidrográficas. El presente trabajo describe las prácticas poscosecha de dos productos obtenidos de un miembro del género *Opuntia* denominado comúnmente planta de nopal. Los productos son conocidos como: tuna y el nopal verdura. La tuna es el fruto de la planta, mientras que el nopal verdura es el cladodio o penca de la planta cosechada cuando aún ostenta una textura tierna, la cual se

tornará fibrosa y no apetecible para el consumidor. En el presente capítulo se describen aspectos botánicos, variedades importantes, la importancia económica del cultivo, características físicas y composición química, índices de madurez y atributos de calidad, fisiología, bioquímica y manejo poscosecha de tuna y de nopal verdura en secciones separadas.

II. Introducción

México es el país con mayor diversidad y abundancia de especies de tuna con alrededor de 80 variedades. Es de señalar que la planta de nopal tunero contiene una gran diversidad de características genéticas que permiten una diversificación de tonalidades en sus frutos: verde, amarillo, blanco y rojo. En México, entre las variedades que más destacan son: alfajayucan, amarilla, blanca burrona, blanca cristalina, criolla, pico chulo, roja y xoconoxtle. (Secretaría del Campo [Secampo], 2022).

El centro de origen y domesticación de la planta del nopal es México, pero actualmente esta planta se encuentra en zonas silvestres de varios países, entre ellos, los países mediterráneos, Angola, Australia, los Estados Unidos de América, Kenia y Sudáfrica (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2023).

2.1 Importancia económica de tuna

El territorio mexicano comprende más del 50 % de zonas áridas y semiáridas que están ubicadas principalmente en el centro y norte del país. Estas son zonas donde la producción agrícola y pecuaria enfrentan severas restricciones debido a las condiciones climáticas e hidrográficas. Sin embargo, se estima que el cultivo de la planta de nopal, debido a su marcada resistencia a la sequía, rusticidad y diversidad de usos, ofrece una opción productiva a muchos productores (Martínez-Romero, 2007). México cuenta con más de 20 mil productores de tuna, quienes en el año 2022 cosecharon 43,547 hectáreas y obtuvieron alrededor de 443 mil toneladas. El mayor volumen de producción se concentró en los estados de México (154,978 ton), Puebla (121,534 ton), Zacatecas (96,430 ton), y Guanajuato (20,047 ton), los cuales sumaron el 88.6 % de la producción nacional de tuna (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023). La cosecha se realiza principalmente de julio a septiembre y las exportaciones de tuna se realizan principalmente a Estados Unidos, Canadá y en menor proporción a Chile, Holanda, Alemania, Bélgica y Francia (Gobierno de México, 2017).

2.2 Características físicas y composición química de tuna

La tuna es una baya de forma oval o alargada (típicamente de 100 a 200 g, ver Figura 1). Consiste en una cáscara gruesa pulposa (del 30 al 40 % del peso total del fruto) rodeando una pulpa jugosa (del 60 al 70 % del peso total del fruto) que contiene muchas semillas duras (del 5 al 10 % del peso de la pulpa) (Barbera *et al.*, 1992; Cantwell, 2021). Cada tipo o especie de *Opuntia* produce frutos de diferentes formas, colores y sabores delicados. La tuna se caracteriza por su alto contenido de azúcar (12-17 %) y baja acidez (0.03-0.12 %) con valores de pH entre 5 y 7. Asimismo, los valores de sólidos solubles totales varían entre 11.6 y 15.3°Brix, incrementando con la madurez del fruto en precosecha (Yahia y Mondragón, 2011). La proporción relativa de glucosa y fructosa varía entre especies y tejidos de la fruta: 53 % de glucosa y 47 % de fructosa del total del contenido de azúcar

(Kuti y Galloway, 1994). La pulpa es también rica en minerales tales como: calcio ($59 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) y magnesio ($98.4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$) (Stintzing *et al.*, 2001). La tuna es una fuente rica de sustancias bioactivas tales como, carotenoides, betalainas y compuestos fenólicos. De estos, los ácidos fenólicos, las betalainas y los flavonoides son mayormente responsables de las propiedades de esta fruta en la promoción de la salud humana (Oniszczuk *et al.*, 2020).

La tuna es rica en carotenoides y sus concentraciones son significativamente más altas en la cáscara que en la pulpa. Sin embargo, variedades de tuna de España, “Sanguinos” (roja) y “Verdal” (naranja) mostraron un nivel de carotenoides totales de 6.6 y de 3.3 veces más en pulpa que en cáscara, respectivamente. La tuna roja tuvo un nivel de carotenoides totales de $256 \text{ } \mu\text{g}/100 \text{ g bh}$ mientras que la tuna naranja un nivel de $379 \text{ } \mu\text{g}/100 \text{ g bh}$. (Cano *et al.*, 2017). La composición nutritiva de las tunas depende de muchos factores; especie, variedad, factores ambientales tales como: condiciones edáficas, manejo del cultivo incluyendo fertilización, manejo poscosecha, así como madurez.

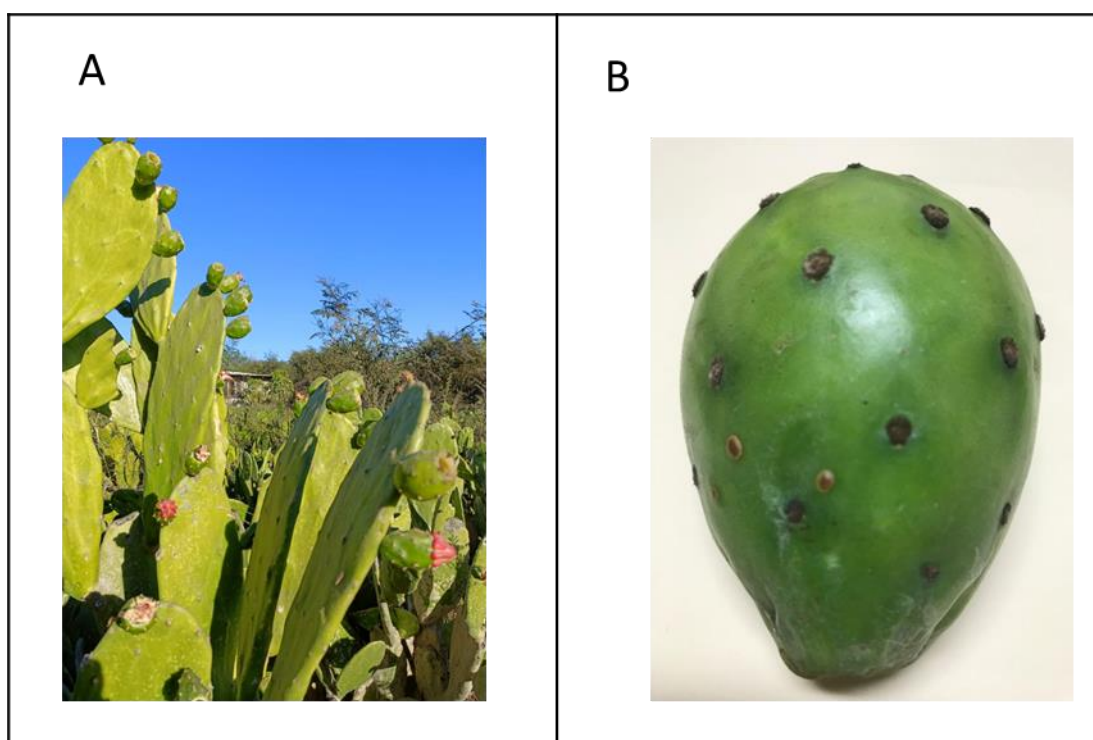


Figura 1. Tuna en planta (A), Fruto de tuna (B).

Los principales componentes de la pulpa son: agua (85 %) y carbohidratos (11 %), con importantes cantidades de vitamina C ($25\text{-}30 \text{ mg } /100 \text{ g bh}$). Silos-Espino *et al.*, (2003) reportaron un nivel de vitamina C de $210 \text{ } \mu\text{g}/\text{g}$ ($21 \text{ mg}/100 \text{ g}$) para "Naranjona" y de $120 \text{ } \mu\text{g}/\text{g}$ ($12 \text{ mg}/100 \text{ g}$) para "Blanca cristalina". Silos *et al.*, (2003) encontraron concentraciones altas (en base seca) de varios minerales (Na, $120\text{-}160 \text{ ppm}$; P, $50\text{-}61 \text{ ppm}$; Fe, $18\text{-}28 \text{ ppm}$; Zn, $12\text{-}16 \text{ ppm}$ y Cu, 5 ppm), ellos mencionan que la tuna contiene todos los minerales sugeridos para una dieta saludable (Ca, P, Fe, Zn, I, Se).

2.3 Índices de madurez y atributos de calidad de tuna

Comercialmente, el estado de madurez al cosechar es muy importante para la calidad de la fruta. Varios índices de madurez externa pueden ser usados, incluyendo: 1) tamaño del fruto, 2) cambios en el color de la cáscara, 3) abscisión de las gloquídias, 4) firmeza del fruto y 5) aplanamiento de la cavidad floral o receptáculo. Estos cambios externos deberían correlacionarse con los atributos de calidad interna, pero su importancia relativa varía entre cultivares. Otras características de calidad importantes incluyen: el porcentaje de pulpa, el espesor de la cáscara y su facilidad para ser removida, así como la resistencia de la piel al manejo físico (Wessels, 1988).

Durante las últimas etapas de desarrollo la pulpa de la fruta acumula azúcares rápidamente. Si se cosecha el fruto demasiado temprano en el proceso de desarrollo se tienen frutos de baja dulzura, por lo cual esta práctica debe evitarse ya que se trata de frutos aún inmaduros. Glucosa y fructosa son los azúcares predominantes en la pulpa de tuna madura, aunque en la cáscara la sacarosa también está presente (Alvarado y Sosa, 1978). Pimienta-Barrios *et al.*, (1987) han identificado numerosos cultivares en los cuales los azúcares reductores comprenden sólo alrededor del 50% de los azúcares totales. Los azúcares y los ácidos son los principales aportadores del sabor y su relación es a menudo empleada como índice de calidad y de cosecha en diferentes frutas (Kader, 1992). Chávez-Franco y Saucedo-Veloz (1985) encontraron que los frutos almacenados de *Opuntia amyclaea* tuvieron calificaciones de dulzura más altos que los frutos de *Opuntia ficus-indica*, aunque los contenidos de sólidos solubles y azúcares fueron similares entre estas frutas. Los niveles de ácido disminuyen durante la maduración y los principales ácidos orgánicos son el oxálico y el cítrico, con menores cantidades de ácido málico y succínico (Barbera *et al.*, 1992).

III. Fisiología y bioquímica poscosecha de tuna

La velocidad de respiración de la tuna es de 20 mL CO₂/kg h a 20 °C, la cual es catalogada baja en comparación con otros frutos comunes. Asimismo, al registrar el comportamiento respiratorio durante su almacenamiento poscosecha, se observa que la tuna no exhibe el incremento abrupto de la actividad respiratoria que sí exhiben los frutos climatéricos durante el proceso de maduración y por lo tanto se le ha clasificado como fruto no climatérico (Cantwell, 2021; Lakshminarayana y Estrella, 1978; Lakshminarayana *et al.*, 1979). La tasa de respiración es baja (Cantwell, 1995), sin embargo, existe variabilidad en el nivel de respiración no climatérica en tuna, la cual depende fuertemente de la variedad, la etapa de madurez al cosechar, y de las condiciones ambientales. López-Castañeda *et al.*, (2010), reportaron que la respiración fue 22 ml de CO₂ kg h⁻¹ en la variedad “Roja Pelona” y de 31 ml de CO₂ kg h⁻¹ en las variedades “Sangre de Toro” y “Alfajayucan”. En tuna cultivada en Italia, concretamente la variedad “Gialla”, mostró una marcada variabilidad en su velocidad de respiración de un año a otro, variando de 4 a 14 mg CO₂ kg h⁻¹ (Chessa y Schirra, 1992). Cuando la fruta es mantenida a temperaturas altas, la respiración declina gradualmente (D’Aquino *et al.*, 2014), pero cuando la fruta es movida de la refrigeración a temperatura ambiente la respiración incrementa notablemente (Schirra *et al.*, 1999), asimismo la concentración de vitamina C (Schirra *et al.*, 1996), la cual presentó al cosechar de 10 a 80 mg 100 g⁻¹ dependiendo del cultivar (Butera *et al.*, 2002; Kuti, 2004). La velocidad de respiración incrementa también por otras condiciones tales como: daño por frío, deterioro por microorganismos, estrés físico o mecánico (raspaduras, impactos o heridas). La producción de etileno en tuna es muy baja (0.2 µl/kg h a 20 °C) y fue similar para frutos cosechados en tres diferentes estadios de madurez, sin embargo, incrementó

ligeramente durante el almacenamiento (Cantwell, 2021). Asimismo, incrementó significativamente por exposiciones prolongadas a temperaturas muy frías o por infección de patógenos (D'Aquino *et al.*, 2014; Schirra *et al.*, 1996, 1997). Respecto a su respuesta a etileno Rosas-Cárdenas *et al.* (2007) reportaron la aparición de transcritos de poligalacturonasa (OsPG) en respuesta a la aplicación de etileno (1000 pL/L) por 1, 6, 12 o 24 h en tuna Blanca Cristalina en estado verde-maduro. Los frutos no climatéricos también se caracterizan generalmente por una carencia de almidón como reserva de carbohidratos, por lo tanto, el incremento en el contenido de azúcares no es significativo después de la cosecha (Seymour *et al.*, 1993). La firmeza de la tuna (medida sobre la parte pulposa de la cáscara después de remover la cutícula) disminuyó lentamente durante un mes de almacenamiento a 20 °C (Cantwell, 1986). Los cambios de firmeza poscosecha de tuna son pequeños en comparación a cambios de firmeza en otros frutos (Seymour *et al.*, 1993). Sin embargo, a medida que el fruto se desarrolla y madura, la cáscara disminuye en espesor y llega a ser más fácil de remover (Wessels, 1988). El adelgazamiento y ablandamiento de la cáscara contribuyen al incremento en susceptibilidad al daño físico durante el manejo del fruto (Cantwell de Trejo *et al.*, 1985).

3.1 Daño por frío

La tuna es susceptible al daño por frío cuando se expone a temperaturas debajo de 10-12 °C por periodos prolongados. Generalmente, a mayor avance del estado de madurez, el fruto es menos susceptible al daño por frío. Los síntomas de daño por frío se manifiestan en cáscara como áreas escaldadas o bronceadas que varían en tamaño e intensidad, o bien como manchas hundidas de color café a negro (D'Aquino *et al.*, 2012). La fruta dañada por frío puede mostrar desórdenes de la cáscara sin provocar cambios en la calidad de consumo o composición química (D'Aquino *et al.*, 2014) o pueden mostrar síntomas mínimos de daño por frío al final de la etapa de refrigeración, pero mostrarán alta susceptibilidad al deterioro cuando se muevan a temperaturas más calientes (Schirra *et al.*, 1996, 1997, 1999; D'Aquino *et al.*, 2014).

3.2 Desórdenes patológicos.

Dado que la fruta generalmente no es almacenada por tiempos prolongados, el riesgo de pudriciones no representa problema serio. Sin embargo, existe el riesgo de infección principalmente en la base de la fruta, debido a las posibles heridas causadas por las operaciones de cosecha. Dichas heridas desarrollan cicatrización mediante un tratamiento de curado a temperatura ambiente con buena ventilación durante uno o dos días. Asimismo, cuando al cosechar se deja una pequeña porción de cladodio unido al fruto, y esta porción se deja deshidratar levemente, se reduce notablemente el riesgo de deterioro (Cantwell, 1995; Inglese *et al.*, 2002). Infecciones adicionales pueden desarrollarse en heridas causadas por ahuates y/o por microgrietas en cáscara que se presentan cuando la fruta de la cosecha tardía es colectada en condiciones húmedas. Los principales hongos filamentosos reportados en tuna son: *Botrytis cinerea*, *Fusarium spp.*, *Aspergillus spp.*, y varias especies de *Penicillium*, incluyendo *P. digitatum*, *P. italicum*, *P. expansum* y *P. polonicum* (Granata y Sidoti, 2002; Swart *et al.*, 2003; D'Aquino *et al.*, 2015; Faedda *et al.*, 2015).

3.3 Manejo poscosecha de tuna

Entre las principales limitantes para el consumo y mercadeo de tunas es la presencia de espinas y gloquidias. Por lo tanto, el desespinado es la operación poscosecha obligada antes de la comercialización. En la fruta para mercado local, el desespinado se lleva a cabo manualmente; la fruta se esparce en un área con pasto cubierta con paja y es cepillada con escobas (Cantwell, 1995). Mientras que, en la fruta destinada a mercados distantes, esta operación se lleva a cabo mediante una máquina desespinaadora. En tuna, las operaciones poscosecha son bastante simples y restringidas al desespinado, clasificación por tamaño y el empaque. El desespinado es generalmente realizado por cepillado en seco. La producción de varios productores puede ser manejada en una empacadora a pequeña escala con una línea de empaque pequeña y simple que tenga los siguientes componentes y características: (1) Una estación de recepción de la fruta en la cual la fruta es vaciada antes de pasar a una serie de rodillos, (2) Un túnel de cepillos cuya rotación debe ser en sentido opuesto al cepillo inmediato adyacente para facilitar la remoción de gloquidias las cuales son extraídas de la unidad por vacío y depositadas en bolsas desechables o bien, se quedan por debajo de los rodillos y de ahí se colectan, (3) Un segundo juego de rodillos que conduce la fruta hacia una mesa redonda rotatoria donde los trabajadores la seleccionan, clasifican y empacan. Las empacadoras de mayor tamaño comprenden lo siguiente: (1) área de recepción, (2) banda de preselección de la fruta, (3) estación de desespinado, (4) estación mecánica o electrónica de selección por tamaño, (5) estación de clasificación y empaque final. Los frutos son generalmente empacados y enviados refrigerados en camión, barco o avión, el mismo día de la cosecha a los mercados destino, ya sea solas o en combinación con otros productos. Se pueden mantener en almacenamiento entre 6 y 10 °C. En Sudáfrica la fruta es encerrada para reemplazar las ceras naturales que se pierden durante el desespinado, reduciendo así la transpiración y mejorando el brillo en cáscara. En Italia, dependiendo del área de producción, la fruta destinada al mercado fresco debe de tener las siguientes características: (1) peso ≥ 120 g, (2) total de sólidos solubles ≥ 13 -14 °Brix, (3) firmeza del fruto 6 kg cm⁻². Las frutas más grandes pueden ser empacadas en charolas de una sola capa que se insertan en cajas de plástico o cartón. La fruta pequeña, generalmente se destina al mercado local, empacada en charolas de plástico conteniendo 6-8 frutas (Inglese *et al.*, 2018).

La tuna es un fruto perecedero debido principalmente a la susceptibilidad al daño físico de cáscara y pedúnculo, infligido durante las operaciones de cosecha, y no tanto debido a su comportamiento fisiológico (Cantwell, 1986; Rodríguez-Félix, 1991; Wessels, 1988). Muchos investigadores han reportado altos niveles de daño físico en la tuna cosechada (Cantwell, 2021; Chávez-Franco y Saucedo-Veloz, 1985; Rodríguez-Félix *et al.*, 1992). La habilidad del cosechador y la variedad determinan el daño que pueda sufrir la base o pedúnculo del fruto. Los frutos ovalados o de forma de barril son más fáciles de cosechar que los frutos elongados y, por lo tanto, sufren menos daño peduncular. La tuna se encuentra unida al cladodio por medio de una articulación que permite el desprendimiento del fruto con solamente girarlo. La cosecha se puede llevar a cabo girando el fruto para desprenderse del cladodio o simplemente cortándolo en el punto de la articulación o incluso, cortando la tuna con un pedazo pequeño de cladodio. En el último de los casos, puede ser "curado" o bien mantenido por uno o dos días bajo condiciones ambientales con un flujo de aire, facilitando que el pedazo de cladodio se seque y sea removido al momento de la selección y empaque. Esta técnica ha sido ampliamente usada en tuna roja de California y es una práctica común en Italia. En algunas especies de *Opuntia* no es posible emplear esta técnica de cosecha debido a la presencia de grandes espinas del cladodio en las cercanías de la base del fruto. Las dificultades asociadas con la cosecha de tuna han

limitado su comercialización. El daño en cáscara por compresión con los dedos al cosechar puede ser visible al momento de la cosecha o bien manifestarse posteriormente como áreas decoloradas que a menudo se deshidratan resultando en una mala apariencia. Este daño por compresión al cosechar resta calidad visual, particularmente a las variedades de cáscara de colores claros (Cantwell, 1995). Tuna Burrón se vio favorecida en su conservación poscosecha al ser removida de la planta con cuchillo debido a que sufrieron menos daño en la base (González *et al.* 2001). El manejo de tuna para el mercado nacional involucra limpieza, selección por tamaño, clasificación por color y empaque en canastos de alrededor de 25 kg. Las gloquidias son generalmente eliminadas esparciendo los frutos sobre una malla abierta y cepillándose con escoba. En el mercado nacional, la fruta de pulpa blanca es la más popular y es presentada en cuatro clases, según el tamaño y tolerancia a defectos (Rodríguez-Félix, 1991). Las operaciones de poscosecha para fruta de calidad de exportación implica un manejo mucho más cuidadoso. Las frutas se cosechan y se colocan sobre canastos de poca profundidad. En la empacadora, las tunas son recibidas en seco y luego pasan a través de una serie de cepillos con la aplicación de un rocío de agua o succión de aire para atrapar y remover las gloquidias. Después del cepillado, las frutas son enceradas, seleccionadas por tamaño y empacadas. Los frutos de tamaño más grande, libres de defectos y de color uniforme son seleccionados para el mercado de exportación; se envuelven en papel y se empaquetan en cajas de cartón en una o dos capas, pesando alrededor de 4.5 kg. En poca cantidad, tunas de todos los colores han sido exportadas, aunque las de pulpa roja son las favoritas en algunos mercados internacionales (Caplan, 1990; Castillo-Castillo y Pimienta-Barrios, 1990). Conforme los frutos maduran su valor nutricional y el sabor mejora, pero las defensas naturales contra patógenos y la susceptibilidad a desórdenes fisiológicos y su vida de anaquel decrecen. Por lo tanto, la tuna como en cualquier otra fruta para entrega directa a los mercados locales, la cosecha debe ser realizada cuando se tenga la más alta calidad comestible; aunque para el transporte a mercados distantes la cosecha de frutos de estados de madurez temprana (madurez fisiológica) es más apropiada debido a la mayor vida poscosecha de estos frutos. Las tunas son particularmente difíciles de cosechar debido a la presencia de gloquidias y espinas las cuales atraviesan la piel de las personas y pueden alojarse en los ojos y en el tracto respiratorio. Así la fruta debe ser cosechada en la mañana cuando la humedad es suficientemente alta para evitar que las gloquidias se desprenden y flotan en el aire. Los cosechadores deben ser provistos con ropa de protección (guantes y lentes de seguridad). A pesar de la habilidad de la planta para tolerar condiciones ambientales relativamente extremas, la fruta es muy sensible y no puede tolerar manejo rudo (Wessels, 1992). Para la mayoría de los cultivares, la separación física del fruto conectado al cladodio madre requiere de cierto esfuerzo el cual puede fácilmente dañar el fruto, cuando éste es separado del cladodio arrancándolo, jalándolo o torciéndolo, al momento de la cosecha. Por lo tanto, para evitar este daño, se debe usar un cuchillo afilado, realizando un corte que deje una pequeña fracción de cladodio pegado a la base del fruto. En campo, los cosechadores usualmente recolectan la fruta en canastas o cubetas de plástico y los vacían en cajas de plástico que pueden contener de 15 a 20 kg de fruta para transportarlos al empaque. El daño físico durante la cosecha y el transporte pueden comprometer marcadamente la calidad de la fruta y su duración en almacenamiento, e incrementar la susceptibilidad de la fruta al deterioro general. La presión de los dedos en el momento del corte del fruto o el impacto cuando la fruta es dejada caer en los cestos de cosecha, así como durante el transporte y manejo en el empaque, pueden causar heridas directas o por gloquidias. Tales heridas pueden transformarse en cortes. La susceptibilidad del fruto al daño físico incrementa por el grado de madurez. La presión celular interna alta también puede causar grietas y

microgrietas en la cáscara, especialmente en la fruta de la segunda cosecha cuando madura en condiciones ambientales más húmedas (Inglese *et al.* 2018).

3.4 Prolongación de la vida poscosecha

Prolongar la vida poscosecha de los frutos permite extender la ventana de oportunidad de comercializar el producto más allá de la época de cosecha. Esto se puede lograr mediante la aplicación de tratamientos poscosecha y de procedimientos de manejo basados básicamente en las siguientes 3 estrategias: 1) reducir las tasas de respiración y transpiración, 2) prevenir el deterioro microbiológico, y 3) incrementar la tolerancia de la fruta a temperaturas bajas en los casos en que el fruto sea sensible al frío. Mientras que la refrigeración es sin duda el medio principal para reducir la actividad metabólica y microbiológica en frutas y hortalizas frescas y así conseguir la prolongación de su vida poscosecha, la susceptibilidad al daño por frío impone límites a su uso, y este es el caso de la tuna. La reducción de las tasas de respiración y de transpiración, se consigue mediante la refrigeración del fruto a temperaturas de 10-12 °C, pero no menores si se quiere evitar el daño por frío (D'Aquino *et al.*, 2012). El deterioro microbiológico por patógenos presentes naturalmente en la superficie de la fruta se puede controlar mediante la aplicación de tratamientos hidrotérmicos consistentes en la inmersión por 2-5 minutos en agua caliente a 50-55 °C (Schirra *et al.*, 1996; 2002; Rodríguez *et al.*, 2005; D'Aquino, 2012) o bien, aplicado como espray de agua caliente a 60, 65 o 70 °C durante 30, 20 o 10 segundos respectivamente (Dimitris *et al.*, 2005). El curado en ambiente saturado de vapor a 38 °C durante 24, 48, y 72 horas controló el deterioro y mejoró la tolerancia del fruto a temperaturas frías (Schirra *et al.*, 1997). El fruto puede ser pre-enfriado en cuarto frío o mediante aire forzado. Se recomienda almacenar la fruta a 6-8 °C con 90-95 % HR. El potencial de almacenamiento es de 2 a 5 semanas dependiendo del cultivar, estado de madurez y temporada de cosecha. Carrillo-López *et al.*, 2001 reportaron una vida poscosecha de 2 semanas para la variedad Naranjona y de 2 meses para la variedad Charola almacenadas a 18 °C. A partir del estudio del sistema de mercadeo para tuna, Castillo-Castillo y Pimienta-Barrios, (1990) estimaron pérdidas poscosecha de aproximadamente un 15%. Tradicionalmente para almacenar tunas en condiciones ambientales durante largos periodos se corta el fruto unido a un pedazo de cladiodo o al cladiodo entero y se almacenan bajo condiciones frescas (Alvarez-Armenta y Cruz-Hernández, 1985; Esquivel-Gómez, 1992; Rodríguez-Félix, 1991). Esta práctica protege al pedúnculo y por lo tanto reduce la incidencia de decaimiento (Cantwell, 1995). La pérdida de agua de la tuna es importante debido a que afecta la apariencia visual y la textura causando una reducción del peso del fruto. Generalmente, los productos pueden perder alrededor del 5 % del peso fresco antes de que la apariencia visual sea afectada (Kader, 1992). Lakshminarayana *et al.* (1979) reportaron que la pérdida de peso de tuna fue aproximadamente de 0.5% por día cuando se almacenó a 20 °C y 60-70% HR, mientras que la pérdida de peso en fruta más madura fue del 1% por día. Por otro lado, la remoción de las gloquidias de "Tuna Blanca" incrementó la pérdida de peso en un 50% sobre aquella con gloquidios. El encerado redujo la pérdida de peso de la fruta sin gloquidias en un 75% (Rodríguez-Félix *et al.*, 1992). El almacenamiento a baja temperatura es un método muy efectivo para reducir la pérdida de peso debido a que reduce el déficit de presión de vapor entre el fruto y el ambiente de almacenamiento (Cantwell, 2021). Al almacenar la tuna variedad "Gialla" a 6 °C y 90-95 % HR, se obtuvo una pérdida de peso de menos de 0.2% por día (Chessa y Schirra, 1992). Otra técnica para reducir la pérdida de peso es el uso de películas de polietileno en cajas. El uso de papel u otro material absorbente evita que la humedad condensada incremente

las pudriciones (Rodríguez-Félix *et al.*, 1992). En Tuna Blanca madura los sólidos solubles de la pulpa incrementaron menos de 1% durante el almacenamiento a 20 °C durante un mes (Cantwell de Trejo *et al.*, 1985). Chávez-Franco y Saucedo-Veloz (1985) también reportaron un pequeño incremento en sólidos solubles para una selección de tunas almacenadas a 18 °C. Sin embargo, Alvarado y Sosa (1978), reportaron una ligera disminución en sólidos solubles y azúcares en tuna después de dos semanas de almacenamiento. Asimismo, Carrillo-López *et al.* (2003) reportaron una disminución de 1.2-1.3 en la magnitud de °Brix durante almacenamiento de tuna naranjona y Charola a 18 °C. El contenido de azúcares de tuna queda esencialmente determinado al momento de la cosecha, con cambios poscosecha relativamente pequeños por lo que es recomendable para asegurar un buen sabor, que las tunas sean cosechadas cuando están completamente maduras. La tuna es sensible al frío causado por la exposición de la fruta a temperaturas menores a 5°C por unos pocos días, caracterizado tanto por la presencia de depresiones o picado (pitting), manchas superficiales de color oscuro, así como por una mayor susceptibilidad a pudriciones. Generalmente se recomienda un almacenamiento entre 5 y 8 °C para una vida poscosecha de alrededor de 3 a 4 semanas (Cantwell, 2021). Sin embargo, Chessa y Schirra (1992) reportaron la aparición de síntomas de daño por frío después de 2 semanas a 6 °C en *O. ficus-indica* cv Gialla, mientras que Chavez-Franco y Saucedo-Veloz (1985) reportaron daños por frío en *O. amyclaea* y *O. ficus-indica* almacenada a 8 o 10 °C por 15 días. Schirra *et al.*, (1999) reportaron que la susceptibilidad de la tuna al daño por frío y a la pudrición depende del cultivar, de las condiciones ambientales de crecimiento y de la edad del fruto. Un fruto maduro es más susceptible a la pudrición que un fruto verde-maduro; mientras que un fruto verde-maduro es más susceptible al daño por frío que un fruto maduro. Asimismo, los frutos cosechados en verano son más sensibles al frío que los frutos cosechados en otoño (Schirra *et al.*, 1999). Por otro lado, Berger *et al.*, (1978) almacenaron fruta de *O. ficus-indica* hasta por 2 meses a 0 °C y concluyeron que éstas son relativamente tolerantes a las bajas temperaturas. El daño físico a la piel y al área peduncular de la fruta durante la cosecha y manejo y/o daño por frío, predispone la tuna al ataque de una serie de patógenos causante de pudriciones, incluyendo *Penicillium spp.*, *Alternaria spp.* y *Dothiorella ribis*. Prácticas realizadas previo al almacenamiento como el curado (1-2 días a 20 °C) pueden favorecer el cierre de heridas. Asimismo, sumergir la fruta en agua a 55 °C por 5 minutos puede reducir la incidencia y severidad de pudriciones durante el almacenamiento. La combinación de tratamiento hidrotérmico (inmersión por 3 minutos a 52 °C) con fungicida tiabendazole (150 mg/L) redujo significativamente el daño por frío y el desarrollo de pudriciones hasta por 6 semanas en la variedad Gialla. (Schirra *et al.*, 2002). La respuesta de la tuna a Atmósfera Controlada ha sido escasamente investigada. Los pocos trabajos llevados a cabo señalan que el almacenamiento de tuna a 5 °C en 2 % O₂ + 2-5 % CO₂, retrasa la maduración y alarga la vida poscosecha a 4-8 semanas, en contraste a 2-4 semanas en almacenamiento en aire (Kader, 2000).

IV. El nopal tipo aprovechamiento hortaliza

El nopal verdura consumido como hortaliza fresca (cladodios tiernos para consumo humano), también denominado nopalito, son tallos modificados con una forma aplanada y ovoide característica y son capaces de ejercer acción fotosintética. Los nopalitos son usados en una gran variedad de platillos, incluyendo salsas, ensaladas, sopas, botanas, encurtidos, bebidas, dulces y postres (Saenz, *et al.*, 2012). En México, son pocas las variedades comerciales destinadas a nopalito. La variedad ‘Milpa Alta’ *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill, fue domesticado en el Estado de Hidalgo, México (Reyes Agüero, *et al.*, 2004). Sus

cladodios son muy apreciados gracias a su color verde brillante, su textura tierna, y sus formas delgadas y planas, su producción se ha dispersado por el país, cubriendo una superficie estimada en 7500 ha. La variedad ‘Atlixco’ *O. ficus-indica* (L.) Mill se originó en el altiplano central de México y se estima que actualmente existen alrededor de 800 ha plantadas, principalmente en los estados circunvecinos a la Ciudad de México, sus nopalitos son de intenso color verde, tiernos, fáciles de pelar, de forma ovoide y más gruesos que los de la variedad “Milpa Alta”, sus cladodios maduros son bien aceptados como forraje. Esta variedad es muy productiva alcanzando hasta 400 ton ha⁻¹ año⁻¹ de materia fresca (Gallegos y Mondragón, 2011). La variedad ‘COPENA V1’ *O. ficus-indica* (L.) Mill. posee cladodios gruesos, de tamaño mediano y sin espinas. Otras variedades menos conocidas productoras de nopalito en zonas tropicales semiáridas son: ‘Valtierrilla’ comercializada como “nopalitos cambray o baby” y la variedad ‘Blanco’ (*Nopalea cochellinifera*), ambas sensible al daño por heladas (Inglese *et al.*, 2018)

4.1 Importancia económica del nopal verdura

Los nopales actualmente se cultivan en gran parte del continente americano. Se les encuentra desde Canadá hasta la Patagonia, Argentina, y desde el nivel del mar hasta los 5,100 m de altitud en Perú (Bravo Hollis y Scheinvar, 1995). Pero además de América, también en África, Asia, Europa y Oceanía (Casas y Barbera, 2002) y se considera que *Opuntia ficus-indica* es la cactácea de mayor valor económico en el mundo (Kiesling, 1999). México presenta la diversidad genética más amplia de *Opuntias* y el más alto consumo del mundo. En México, la participación de los nopalitos en la producción de hortalizas corresponde a 5.4% del total nacional. (Reyes Agüero *et al.*, 2005). Las principales especies cultivadas son *O. ficus-indica*, *O. xoconoxtle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha* (Pimienta-Barrios, 1990). El nopal es el cultivo de temporal más confiable y redituable en las regiones marginales semiáridas del centro de México. El nopal es mejor opción que el maíz o frijol en áreas expuestas a la sequía, mientras que, en regiones menos marginales el nopal puede complementar el ingreso obtenido por maíz y/o frijol (Inglese *et al.*, 2018). México en el año 2021, fue el principal productor de nopal a nivel mundial con una producción de 868,956 toneladas. Es de notar que en la última década la producción promedio ha sido de 840,000 toneladas. (Panorama agroalimentario 2022). Las principales entidades productoras de nopalitos están distribuidas en cuatro regiones del país. En la región centro participan los estados de Morelos, Ciudad de México, Estado de México y Puebla, de la región centro-occidente: Jalisco, Michoacán y Aguascalientes. De la región Noroeste: Baja California y de la región Noreste: Zacatecas y Tamaulipas. En 2021, el estado de Morelos fue el principal productor de nopalitos con un volumen de 405,581 toneladas, que representó una derrama comercial de mil 287 millones de pesos y correspondió a una participación de casi la mitad de la producción total del país. En México hay disponibilidad de nopalitos en todos los meses del año, siendo los meses de marzo a junio los de mayor producción. Las exportaciones mexicanas han exhibido un continuo aumento, por ejemplo, las aportaciones económicas han incrementado desde 12.7 hasta 22.1 millones de dólares desde 2015 a 2021, cuyo volumen en este último año alcanzó una cifra máxima de 61,387 toneladas. Estados Unidos es el principal destino participando con 21.86 millones de dólares. Otros países a los que se exporta son Corea del Sur, Canadá, Malasia, Países Bajos, entre otros (SIAP, 2022).

4.2 Características físicas y composición química del nopal verdura

Las plantas de nopal conforman el grupo vegetal con más especies y más amplia distribución de los cactus. Se caracterizan por sus tallos planos o pencas en forma de paleta cubiertos de pequeños agrupamientos de pelos rígidos llamados gloquidias y, por lo general, también de espinas. Los nopalitos son brotes o pencas tiernas de 10 a 25 cm de largo, carnosos, de color verde y aplanados que se consumen como verdura (Inglese *et al.*, 2018) (Figura 2).

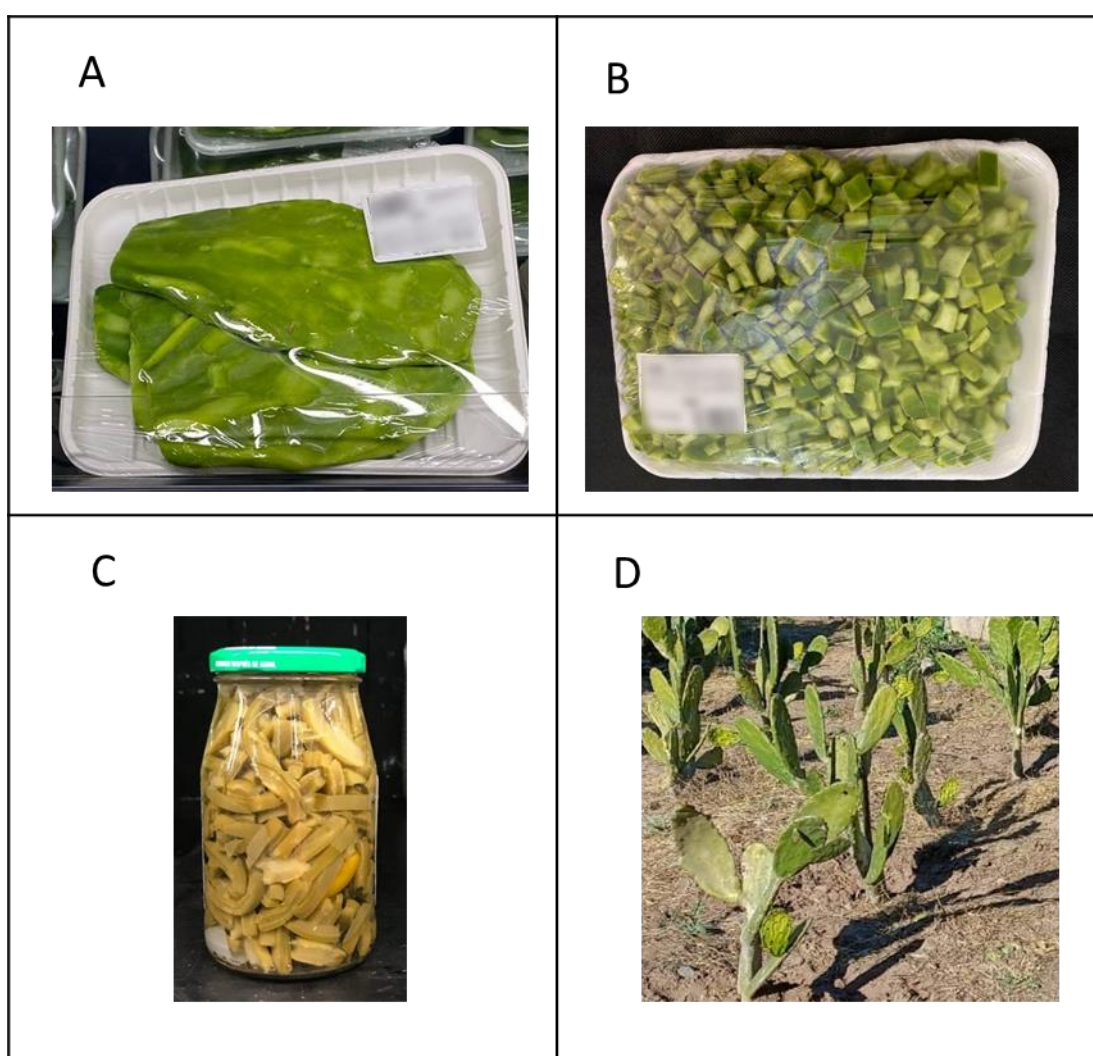


Figura 2. Nopalitos frescos en penca (A), Nopalitos frescos en trozos (B), Nopalitos encurtidos (C), Plantas de nopalitos (D).

La composición proximal de los nopalitos se presenta en el Cuadro 1. Los nopalitos frescos tienen alto contenido en zinc, fósforo, calcio y fibra; también aporta vitamina C y se considera benéfico para el tratamiento de diversos padecimientos. En la planta del nopal, los cladodios (nopalitos) contienen más carotenoides que los frutos (tunas), independientemente del cultivar (de Wit *et al.*, 2019). Medina-Torres *et al.*, (2011) encontraron en cladodios mayores cantidades de carotenoides que en zanahoria pequeña (baby carrots), betabel, espinaca, y lechuga. Su potencial alimenticio también se debe a su contenido de fibra dietaria (0.023-0.027 g/g bh), vitamina A (0.0183-0.22 mg/g bh), β -caroteno (0.113-0.535 μ g/g bh), 18 diferentes aminoácidos, minerales y fitoquímicos (Ventura *et al.*, 2017).

Cuadro 1. Composición proximal de Nopalitos frescos (Rodríguez-Félix and Cantwell, 1988).

Componente	% bh
Agua	92
Proteína	1-2
Grasas	0.2
Carbohidratos totales	4-6
Cenizas	1.3
Fibra cruda	1.1

Los carotenoides totales en nopalito fresco resultaron en un nivel de 247.8 μ g/g bs, de los cuales el 45 % fue de luteína, 36 % de β -caroteno y 19 % de α -criptoxantina (González-Cruz *et al.*, 2012). Adicionalmente, 100 g de cladodios contienen 11 mg de vitamina C. El mucílago es un polisacárido, puede ser encontrado en células almacenadoras especializadas o libres en los espacios intercelulares de los tejidos parénquima o colénquima de los cladodios. Los nopalitos se caracterizan por su acidez, la cual es debida a la ruta fotosintética CAM típica de los opuntias, y puede afectar la aceptabilidad por nuevos consumidores. La acidez varía significativamente (0.1-0.5 % de acidez titulable) dependiendo de la hora del día (Corrales-García *et al.*, 2010). De acuerdo con Corrales-García (2004), la acidez de varios cultivares de nopalitos decreció durante el día en relación con la exposición a la luz. Aun separados de la planta, el decremento es evidente, debido a que el cladodio permanece fotosintéticamente activo. Cantwell, (2021) reportó valores de 0.54 % en la mañana decreciendo a 0.05 % en la tarde. Debido a ello, Pimentel González (2013) recomienda que la cosecha de nopalitos se realice 2 horas después de la salida del sol. En cualquier caso, la cosecha se hace tradicionalmente a horas tempranas de la mañana cuando la temperatura es relativamente más baja y la humedad es más alta, siendo así, los cosechadores se exponen menos a las gloquidias. También, la acidez parece depender de la variedad, según un estudio de 21 cultivares de nopal verdura llevado a cabo por Aguilar Sánchez (2007), quien reportó que ‘Jalpa’, ‘Morado’ e ‘Italiano’ presentaron alrededor

de 0.43 %, “Milpa Alta” 0.68 %, y “Oreja de Elefante” 0.69 %; esta última también usado como nopal forrajero. También, la acidez puede ser afectada por la temperatura de almacenamiento. La acidez se mantiene o incrementa ligeramente en nopalito almacenado a 5 °C, mientras que esta se reduce en almacenamiento de 20 °C.

4.3 Manejo poscosecha de nopal verdura

Los cladodios tiernos pueden ser cosechados entre 30 y 60 días después de la brotación, cuando alcancen un peso de 80-120 g y una longitud de 15-25 cm (Flores Valdés, 1995). Los cladodios mayores a 25 cm se tornan fibrosos y pierden su textura tierna y aceptabilidad por el consumidor (Corrales-García, 2000). Los nopalitos presentan espinas y gloquidias, por lo que usualmente se requiere usar guantes de látex para su cosecha. Las pencas tiernas son removidas cuidadosamente insertando el cuchillo en la base del nopalito, una operación que requiere habilidad para cosecharlas intactas. Son depositados en cestos o cubetas de plástico y seleccionados de acuerdo con los tamaños estándar requeridos por el mercado: pequeño (cambray), mediano y grande. Dependiendo del mercado de destino el productor puede empacarlos en pacas rectangulares envueltas en plástico o pacas cilíndricas cubiertas con papel de envoltura. La remoción de espinas o pelado de nopalitos se lleva a cabo mediante la eliminación manual de espinas usando un cuchillo afilado y guantes de neopreno.

4.4 Almacenamiento

La calidad que poseen los nopalitos recién cosechados puede mantenerse por 3 semanas mediante el almacenamiento en refrigeración a 5 °C, o bien, por 2 semanas a 10 °C con 90-95 % de HR (Cantwell *et al*, 1992). Los principales factores limitantes de la vida poscosecha de los nopalitos son el deterioro microbiológico y la deshidratación. Los nopalitos almacenados a temperatura ambiente rápidamente pierden su apariencia verde brillante, tornándose en verde opaco seguido de amarillamiento y desarrollo de curvatura de las pencas por pérdida de agua. Los nopalitos pueden presentar daño por frío cuando se almacenan por más de 3 semanas a 5 °C. El daño por frío se manifiesta como desarrollo de apariencia bronceada superficial y desarrollo de pudriciones (Cantwell *et al*, 1992).

V. Literatura citada

- Aguilar-Sánchez, L., Martínez-Damián M. A., Barrientos-Priego A. F., Aguilar-Gallegos N. y Gallegos-Vásquez C. 2007. Potencial de oscurecimiento enzimático de variedades de nopalito. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 9, 165–184.
- Alvarado, y Sosa, L. 1978. *Fisiología y bioquímica del desarrollo del fruto del nopal tunero (Opuntia amyoclaea Tenore)*. [Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados].

- Álvarez-Armenta, R. y Cruz-Hernández J. P. 1985. La influencia del cladodio aislado en la conservación de la tuna (*Opuntia amyclaea Tenore*). Congreso Nacional de Horticultura. Hermosillo, Sonora, México.
- Barbera, G., Carimi F., Inglese P. y Panno, M. 1992. Physical, morphological and chemical changes during fruit development and ripening in three cultivars of prickly pear, *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Journal of Horticultural Science*, 67, 307-312.
- Berger, S. H., Ortuzar R. Z., Auda M. C., Lizana M. L. A. y Rreszczynski P. A. 1978. Conservación de tunas (*Opuntia ficus-indica*) en almacenaje refrigerado. *Investigación Agrícola*, 4, 21-24.
- Bravo-Hollis, H. y Scheinvar, L. 1995. El interesante mundo de las cactáceas. Mexico, National Council of Science and Technology.
- Butera, D., Tesoriere L., Di Gaudio F., Bongiorno A., Allegra M., Pintaudi A. M., Kohen R. y Livrea, M. A. 2002. Antioxidant activities of sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: betanin and indicaxanthin. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(23), 6895–6901. <https://doi.org/10.1021/jf025696p>
- Cano, M. P., Gómez-Maqueo A., García-Cayuela T., y Welte-Chanes J. 2017. Characterization of carotenoid profile of Spanish Sanguinos and Verdal prickly pear (*Opuntia ficus-indica*, spp.) tissues. *Food Chemistry*, 237, 612-622.
- Cantwell de Trejo, M., Montiel-Rodríguez S., Vega-Flores A. y Ayala-Lizárraga S. 1985. Cambios físico-químicos durante la maduración y almacenamiento de tunas de selecciones de *Opuntia amyclaea*. Congreso Nacional de Horticultura, Hermosillo, Sonora, México.
- Cantwell, M. 1986. Postharvest aspects of prickly pear fruits and vegetable cladodes. *Perishables Handling* (University of California Davis) 59, 6-9.
- Cantwell, M. 1995. Postharvest management of fruits and vegetables stems. Barbera, G., Inglese, P. y Pimienta-Barrios, E. (Eds). *Agroecology, cultivation and uses of cactus pear*. Fao Plant Production and Protection Paper 132.
- Cantwell, M. 2021. Quality and postharvest physiology of «Nopalitos» and «Tunas». *Journal of The Professional Association for Cactus Development*, 50-66.
- Caplan, K. 1990. Marketing strategies for cactus pear and cactus leaves for the 1990s. En: Felker, P. (Ed.) *Proceedings First Annual Texas Prickly Pear Council*. Texas A&I University, Kingsville, Texas, USA.
- Carrillo-Lopez, A., Cruz-Hernandez A., Guevara-Lara F. y Paredes-Lopez, O. 2003. Physico-chemical changes during ripening in storage of two varieties of prickly pear stored at 18 °C. *Journal of Food Science and Technology-mysore* 40, 461-464.
- Casas, A. y Barbera G. 2002. Mesoamerican domestication and diffusion. En P. S. Nobel (Ed.), *Cacti Biology and Uses* (pp. 143-162). University of California Press.
- Castillo-Castillo, M. y Pimienta-Barrios, E. 1990. Comercialización, El Nopal: su conocimiento y aprovechamiento (pp. 336-343) Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, México.
- Chávez-Franco, S. y Saucedo-Veloz, C. 1985. Conservación en refrigeración de dos variedades de tunas. *Horticultura Mexicana*. 1(1), 6-13.

- Chessa, I. y Schirra, M. 1992. Prickly pear cv “Gialla”, intermittent and constant refrigeration trials. *Acta Horticulturae*, 296, 129-137.
- Corrales-García, J. 2000. *Fisiología y tecnología postcosecha del fruto de tuna y del nopal verdura*. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Corrales-García, J., Peña-Valdivia C. B., Razo-Martínez Y. y Sánchez-Hernández, M. 2004. Acidity changes and pH-buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biology and Technology*, 32(2), 169-174.
- Corrales-García, J. 2010. Perspectivas agroindustriales de la postcosecha de nopalito y la tuna. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5, 1-22.
- D’Aquino, S., Barberis A., Continella A., La Malfa S., Gentile A. y Schirra M. 2012. Individual and combined effects of postharvest dip treatments with water at 50 °C, soy lecithin and sodium carbonate on cold stored cactus pear fruits. *Communications in agricultural and applied biological sciences*, 77(3), 207–217.
- de D’Aquino, S., Chessa I. y Schirra M. 2014. Heat treatment at 38 °C and 75–80% relative humidity ameliorates storability of cactus pear fruit (*Opuntia ficus-indica* cv ‘Gialla’). *Food Bioprocess Technology*, 7, 1066–1077.
- D’Aquino, S., Palma, A. Schirra M., Continella A., La Malfa S. y Gentile A. 2015. Decay control of cactus pear by pre- and post-cold storage dip treatments with fludioxonil, sodium bicarbonate and water at 50 °C. *Acta Horticulturae*, 1067, 119–125.
- Dimitris, L., Pomodakis N., Markellou E. y Lionakis S. M. 2005. Storage response of cactus pear fruit following hot water brushing. *Postharvest Biology and Technology*, 38(2), 145–151.
- Esquivel-Gómez, D. 1992. *Una alternativa para mejorar la comercialización de la tuna*. V Congreso Nacional y III Congreso Internacional. Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Chapingo, México.
- Faieda, R., Pane A., Cacciola S. O., Granata G., Salafia L. y Sinatra F. 2015. *Penicillium polonicum* causing a postharvest soft rot of cactus pear fruits. *Acta Horticulturae*, 1067: 193–197.
- Flores-Valdez, C. A. 1995. Nopalitos production, processing and marketing. En G. Barbera, P. Inglese y E. Pimienta Barrios (Eds.) *Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear*, (pp. 92–99). FAO Plant Production and Protection Paper No. 132. Rome, FAO.
- Gallegos-Vazquez, C. y Mondragon-Jacobo C. 2011. Cultivares selectos de tuna, de México al mundo. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Gobierno de México. 2017. La TUNA, una fruta muy mexicana.gob.mx. <https://www.gob.mx/firco/articulos/la-tuna-una-fruta-muy-mexicana?>
- González-González, R., Morales O. T., Olivares-Sáenz E., Aranda-Ruiz J. y Gallegos-Vázquez, C. 2001. Conservación de una variedad de tuna (Burrona) bajo diferentes manejos poscosecha. *Ciencia UANL*. 4(3), 322-329.
- González-Cruz, L. Filardo-Kerstupp S., Bello-Pérez L. A., Güemes-Vera N. y Bernardino Nicanor A. 2012. Carotenoid content, antioxidant activity and sensory evaluation of low-calorie nopal (*Opuntia ficus-indica*) marmalade. *Journal of Food Processing and Preservation*, 36: 267-275.

- Granata, G. y Sidoti, A. 2002. Survey of diseases discovered on *Opuntia ficus-indica* in producer countries. *Acta Horticulturae*, 581, 231–237.
- Inglese, P., Mondragon C., Nefzaoui A., Saenz C., Taguchi M., Makkar H. y Louhaichi M. 2018. Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Inglese, P., Basile F. y Schirra M. 2002. Cactus pear fruit production. En P.S. Nobel (Ed), *Cacti: biology and uses* (pp. 163–184. University of California Press.
- Inglese, P., y Kuti, J. O. 2004. Antioxidant compounds from four *Opuntia* cactus pear varieties. *Food Chemistry*, 85(4), 527–533.
- Lakshminarayana, S. y Estrella, I. B. 1978. Postharvest respiratory behaviour of tuna (Prickly pear) fruit (*Opuntia robusta* Mill.). *Journal of Horticultural Science*, 53(4), 327-330.
- Lakshminarayana, S., Alvarado y Sosa L., y Barrientos-Pérez, F. 1979. The development and postharvest physiology of the fruit of prickly pear (*Opuntia amyclaea* tenore). En G.E. Inglett G. E. y G. Charalambous G. (Eds). *Tropical Food: Chemistry and Nutrition* (Vol.1, pp. 69-93). Academic Press.
- Kader, A. A. 1992. Postharvest technology of horticultural crops. (pp. 296). University of California SpECIAL publication 3311.
- Kader, A. 2000. Cactus (prickly) pear. Produce Facts. Recommendations for maintaining postharvest quality.
- Kiesling, R. 1999. Origen, domesticación y distribución de *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 3, 50-59.
- Kuti, J. O. y Galloway C. M. 1994. Sugar composition and invertase activity in prickly pear fruit. *Journal of Food Science*, 59(2), 387-388.
- Martínez Romero, F. 2007. Monografía del nopal tunero. Secretaría del Desarrollo Rural del Estado de Puebla.
- Medina-Torres L., Vernon-Carter E. J., Gallegos-Infante J. A., Rocha-Guzmán N. E., Herrera-Valencia, E. E., Calderas, F. y Jiménez-Alvarado R. 2011. Study of the antioxidant properties of extracts obtained from nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes after convective drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), 1001–1005.
- Oniszcuk, A., Wójtowicz A., Oniszcuk T., Matwijczuk A., Dib A., y Markut-Miotła E. 2020. *Opuntia* fruits as food enriching ingredient, the first step towards new functional food products. *Molecules*, 25(4), 916. <https://doi.org/10.3390/molecules25040916>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2023. *Nopal*.
- Pimienta- Barrios, E., Delgado-Alvarado A. y Leguizano R. M. 1987. Evaluación de la variación en formas de Nopal (*Opuntia* spp.) tunero en la zona centro de México. *Strategies for Classification and Management of Native Vegetation for Food Production in Arid Zones*. (pp. 82-86). USDA/RM/SARH/INIFAP General Technical Report -150

- Pimentel-González, D. J. 2013. Manejo poscosecha del nopal. En J. C. Guevara-Arauza, y J. J. Ornelas-Paz, (Eds). *Tecnología poscosecha y efectos biofuncionales del nopal y la tuna* (pp. 87–114). Editorial Trillas.
- Reyes-Agüero, J.A., Aguirre-Rivera J. R. y Carlín C. F. 2004. Análisis preliminar de la variación morfológica de 38 variantes mexicanas de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. En G. Esparza-Frausto, R. D. Valdéz-Cepeda, Méndez-Gallegos, S. J. (Eds). *El nopal: tópicos de actualidad* (pp. 21-47). Universidad Autónoma de Chapingo.
- Reyes Agüero, J. A., Aguirre Rivera J. R. y Flores Flores J. L. (2005). Variación morfológica de *Opuntia* (cactaceae) en relación con su domesticación en la Altiplanicie Meridional de México. *Interciencia*, 30(8), 476-484.
- Rodríguez-Felix, A. 1991. Postharvest handling for minor fruits in México. En: Yahia, E.M. e Higuera, I. (Eds). *Proc. National Symposium on Postharvest Physiology and Technology of Horticultural Crops in México* (pp. 305-310). Editorial Limusa.
- Rodriguez-Felix A., Gonzalez-Salas M. I., Soto-Valdez H. y Silveira-Gramont M. I. 1992. *Effects of postharvest treatments on the quality of Tuna during storage*. Proceedings-Third Annual Texas Prickly Pear Conference, Texas Prickly Pear Council, McAllen, Texas. pp. 9-21.
- Rosas-Cárdenas, F. F., Valderrama-Chairez M. L., Cruz-Hernández A. y Paredes-López, O. 2007. Prickly pear polygalacturonase gene: cDNA cloning and transcript accumulation during ethylene treatment, cold storage and wounding. *Postharvest Biology and Technology*, 44(3), 254-259.
- Secretaría del Campo. 2022. Cierra EDOMEX año 2022 como líder nacional en producción de tuna. <https://secampo.edomex.gob.mx/eventos-comunicados/cierra-edomex-ano-2022-como-lider-nacional-en-produccion-tuna>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). Panorama Agroalimentario 2022.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (10 de abril de 2023). Cierre de la producción agrícola por estado.
- Schirra, M., Barbera G., D'Aquino S., La Mantia T. y McDonald R.E. 1996. Hot dips and high-temperature conditioning to improve shelf quality of late-crop cactus pear fruit. *Tropical Science*, 36, 159–165.
- Schirra, M., Agabbio M., D'Aquino S. y McCollum, T. G. 1997. Postharvest heat conditioning effects on early ripening 'Gialla' cactus pear fruit. *HortScience*, 32(4): 702–704.
- Schirra, M., Inglese P. y La Mantia T. 1999. Quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) fruit in relation to ripening time, CaCl_2 preharvest sprays and storage conditions. *Scientia Horticulturae*, 81(4), 425–436.
- Schirra, M., Brandolini V., Cabras P., Angioni A. y Inglese P. 2002. Thiabendazole uptake and storage performance of cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill Cv Gialla] fruit following postharvest treatments with reduced doses of fungicide at 52 °C. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50, 739-743.
- Seymour, G., Taylor, J. y Tucker, J. A. 1993. *Biochemistry of Fruit Ripening*. Chapman & Hall, London.

- Silos-Espino, H., Fabian-Morales, L., Osuna-Castro J. A., Valverde M. E., Guevara-Lara F. y Paredes-López O. 2003. Chemical and biochemical changes in prickly pears with different ripening behaviour. *Nahrung-Food*, 47(5), 334–338.
- Stintzing, F. C., Schieber A. y Carle, R. 2001. Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *European Food Research and Technology*, 212(4), 396-407.
- Stintzing, F. C., Schieber A. y Carle R. 2001. Phytochemical and nutritional significance of cactus pear. *European Food Research and Technology*, 212(4), 396-407.
- Swart, W. J., Oelofse, R. M. y Labuschagne M. T. 2003. Susceptibility of South African cactus pear varieties to four fungi commonly associated with disease symptoms. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 5, 86–97.
- Ventura-Aguilar, R. I., Bosquez-Molina E., Bautista-Baños S., y Rivera-Cabrera F. 2017. Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), 5065–5073.
- Wessels, A.B. 1992. Turksvye vir die mark (1): klimaat en kultivars. *Landbouweekblad*, 4 Sept.: 40–41.
- Wessels, A. B. 1988. Spineless prickly pear, Perskor Publishers.
- Wit, M., du Toit A., Osthoff G. y Hugo A. 2019. Cactus pear antioxidants: a comparison between fruit pulp, fruit peel, fruit seeds and cladodes of eight different cactus pear cultivars (*Opuntia ficus-indica* and *Opuntia robusta*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(3), 2347-2356.
- Yahia, E. M., Mondragon-Jacobo, C. 2011. Nutritional components and anti-oxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Food Research International*, 44(7), 2311-2318.

7. MICRO RNA's PARA EL ESTUDIO DE LA MADURACIÓN DE LA TUNA

¹Morales Alonso S. I., ¹Arellano Perusquia A. A., ¹Bañuelos Hernández B., ¹Albarrán Tamayo F. y ¹Cruz Hernández A.

¹Universidad De La Salle Bajío campus Campestre. Av. Universidad 602. Col Lomas del Campestre, León, Gto.

Correspondencia: CHA ORCID: 0000-0002-6808-5026, acruz@lasallebajio.edu.mx

Tema	Página
I. Resumen.	129
II. Maduración y cambio moleculares.	130
2.1 Generación de microRNAs.	130
2.2 Biosíntesis y mecanismo de acción de los microRNAs.	132
2.3 Ejemplos de funciones biológicas de miRNAs en plantas.	132
2.4 miRNAs asociados a la maduración y desarrollo de frutos.	132
III. Nopal tunero.	135
3.1 Secuenciación de genoma de nopal.	135
3.2 Expresión de microRNAs en tuna.	136
3.3 Conclusiones.	137
3.4 Agradecimiento.	137
IV. Literatura citada.	137

I. Resumen

El nopal (*Opuntia* sp) es una planta nativa de México que puede crecer bajo cualquier condición ambiental, es una especie ancestral que permitió el establecimiento de la cultura Mexica y que ha servido desde entonces a la autosuficiencia y seguridad alimentaria en México. La tuna, fruto del nopal, tiene una gran variabilidad, lo que la hace atractiva para su comercialización, sin embargo, este fruto presenta dos desventajas: el número y tamaño de sus semillas y la presencia de espinas, que han limitado su potencial comercial. Sería de gran interés identificar el origen genético de estas características para incorporarlas en un programa de mejoramiento, ante la carencia de un genoma del nopal tunero el estudio de los microRNAs como agentes reguladores puede abrir una luz para comprender la maduración de la tuna, sus diferentes características a nivel molecular que pueda ser útil en los programas de mejoramiento

Palabras clave: miR156, miR160, *Opuntia*.

II. Maduración y cambios moleculares

La maduración de frutos es un proceso complejo que involucra una serie de cambios relacionados con el sabor, el color y la textura. Es controlado por procesos como la comunicación celular, y es influenciado por reguladores de crecimiento y señales ambientales. (Brady, 1987; Giovannoni, 2001). Las modificaciones por efecto de la maduración, involucra una serie de cambios bioquímicos, metabólicos y moleculares que afectan los compartimentos celulares (Cuadro 1), estos cambios resultan en alteraciones de enzimas o vías metabólicas completas. El cambio de color por ejemplo es debido a alteraciones en el contenido de clorofila y pigmentos como carotenoides y antocianinas en los plástidos (Zhang *et al*, 2015; Cruz-Hernández, 2012). El ablandamiento es debido a cambios en el metabolismo de la pared celular, por la solubilización parcial de pectinas, celulosa y la degradación de almidón; lo que resulta en cambios en la textura. Para el sabor y aroma, son comunes las alteraciones en el metabolismo de ácidos orgánicos y la síntesis de compuestos volátiles (Cruz-Hernández, 2012; Tieman *et al.*, 2017). Estudios genéticos sugieren que la expresión específica de genes es requerida en el proceso, esto se ha sido demostrado a través de los cambios en la expresión de RNAs mensajeros específicos y en la síntesis de novo de proteínas durante el proceso de maduración de diferentes tipos de frutos (Cruz-Hernández, 2012). Estos cambios en la expresión genética involucran genes localizados en el núcleo y en los plástidos y algunos de ellos están confinados a tejidos de frutos durante la maduración. El entendimiento de la maduración está acompañado del entendimiento del control metabólico, la comunicación entre organelos, los mecanismos de acción de las hormonas vegetales y la regulación de la expresión genética durante el desarrollo.

Actualmente se han desarrollado estrategias para que a través del uso de secuencias genómicas puedan establecer programas de mejoramiento que permitan identificar las secuencias genéticas clave que puedan considerarse en los futuros programas de mejoramiento. Es a través de estas estrategias que se identificaron las secuencias relacionadas con el aroma, el sabor y el gusto en sistemas como jitomate en una disciplina llamada ahora como agrogenómica (Tieman *et al*, 2017).

2.1 Generalidades de microRNAs

Los microRNAs (miRNAs) son una clase de los RNAs pequeños no-codificantes que regulan la expresión genética en eucariotas. Están involucrados en diferentes procesos de desarrollo de las plantas, incluido el desarrollo de frutos y muy recientemente se han reportado como parte de los mecanismos de respuesta a enfermedades y otros tipos de estrés (Lin *et al*, 2018; Xia *et al*, 2018). Los miRNAs juegan un papel esencial en la regulación postranscripcional de genes y tienen como blancos un gran número de factores de transcripción y otras proteínas regulatorias sugiriendo un papel en el control de rutas regulatorias y en el desarrollo (Cedillo-Jiménez *et al.*, 2016, Cedillo-Jiménez *et al.*, 2020).

Los miRNAs son una clase RNAs que presentan una estructura de tallo y asa, y están caracterizados por la eliminación precisa de sus productos funcionales que dan lugar a sus miRNAs maduros (Axtel, 2013). Los miRNAs tienen una serie de RNAm blancos definidos, las familias de miRNAs suelen ser muy conservadas evolutivamente (Jones-Rhoades *et al*, 2012). Muchos de los miRNAs vegetales requieren al menos un miembro de la familia DCL-1 para su biogénesis, y un miembro de la familia AGO1 para poder ejercer su función, aunque hay algunas excepciones (Cuperus *et al*, 2010).

Cuadro 1. Cambios que ocurren durante la maduración de frutos.

Cambios Físicoquímicos	Característica	Causa
	Textura	Alteraciones en pared celular, solubilización de pectinas, celulosas y hemicelulosas, Degradación de almidón
	Color	Degradación de clorofila, síntesis de carotenoides y antocianinas
	Olor	Síntesis de compuestos aromáticos y volátiles
	Sabor	Síntesis de azúcares simples, síntesis de ácidos orgánicos
Cambios metabólicos y moleculares		
	Respiración	Síntesis CO ² y etileno
	Expresión genética	Encendido y apagado de genes, síntesis de RNAs pequeños
	Rutas metabólicas	Redirección de Sustratos, inhibidores y proteínas

Algunas de las familias de miRNAs de plantas son conservados, estos pueden conservarse desde musgos hasta plantas con flores (Buxford *et al*, 2010). Los miRNAs conservados tienen blancos de RNA mensajeros homólogos en muchas especies, demostrando que las funciones miRNA/RNA blanco son muy estables evolutivamente (Cuperus *et al*, 2010). Sin embargo, algunas relaciones entre los miRNAs y sus blancos puede ser novedosa, por ejemplo, miR159 es un miRNA altamente conservado que actúa sobre factores de transcripción MYB en muchas especies vegetales. Buxdorf *et al*. (2010), encontró en jitomate que miR159 también actúa sobre un miRNA diferente de los factores MYB: SGN-U567133. La expresión de SGN-U567133 causa defectos en el desarrollo, sugiriendo que la regulación de la expresión a través de miR159 de una forma no-canónica tiene una consecuencia funcional (Axtel, 2013).

Los miRNAs en plantas, aunque conservados pueden presentarse de forma única en alguna de las especies vegetales y algunos otros pueden ser conservados solo entre especies cercanas. Los miRNAs específicos de un linaje son diferentes de alguna manera de los miRNAs más conservados. Estos miRNAs tienen un procesamiento más heterogéneo a partir del precursor con la estructura de tallo y asa, tiene baja abundancia y son codificados por un gen único, en comparación con los miRNAs de genes múltiples (Axtel, 2013). Estas diferencias sugieren que algunos miRNAs específicos de algún linaje podrían ser transitorios, no-funcionales y en muchos casos se caracterizan como un grupo distinto de miRNAs.

2.2 Biosíntesis y mecanismo de acción de los microRNAs

El modo de acción de los miARN entre los reinos vegetal y animal es diferente (Pogue *et al*, 2014). La biogénesis de miARN en plantas se ha documentado utilizando *Arabidopsis thaliana* como planta modelo (Axtel, 2013). Los miRNA primarios (pri-miRNA) son transcritos por la ARN polimerasa II (Figura 1), desde regiones entre genes codificantes (Ameres *et al*, 2013).

El pri-miRNA adquiere una estructura secundaria en horquilla, y su longitud oscila entre aproximadamente 70 y muchos cientos de bases. La proteína Dawdle (DDL) es una proteína de unión a ARN que estabiliza un subconjunto de pri-miRNA para su posterior exportación a cuerpos D (Vaucheret, 2015). Los cuerpos D son compartimentos donde se encuentran los miRNA. procesado por la acción conjunta de Serrate (SE) e Hyponastic deja 1 (HYL1) que junto con Dicer-like 1 (procesan el pri-miRNA en un precursor-miRNA (pre-miRNA).

Posteriormente, DCL1 libera el dúplex de miRNA que contiene el miRNA maduro y el miRNA pasajero (Figura 1) (Vaucheret, 2015). El miRNA liberado por DCL1 se exporta fuera del núcleo a través del ortólogo de exportina-5' (HASTY). El pre-miRNA se convierte en un miARN maduro, pero la doble cadena persiste, por lo que una de las dos cadenas es la cadena guía y la otra es la pasajera (que se degrada), el miRNA guía maduro es metilado por HEN1 para evitar la degradación por nucleasa degradante de sRNA (Jover-Gil *et al*, 2012).

El siguiente paso es el reclutamiento del miRNA por una proteína Argonaute (AGO). En *Arabidopsis thaliana* estaban presentes 10 proteínas AGO diferentes (Zhang *et al*, 2015). El complejo AGO/miRNA maduro encuentra el ARNm objetivo en función de la complementariedad entre la secuencia guía y el ARNm, luego escinde su objetivo gracias a la actividad de corte de AGO (Figura 1).

2.3 Ejemplos de funciones biológicas de miRNAs en plantas

Para identificar la función de los microRNAs es necesario analizar su expresión y la de los blancos, con los cuáles interactúan de forma negativa. Una mejor prueba de la función de los microRNAs es su expresión en plantas transformadas donde se pueda evaluar su efecto en los procesos de interés (Rosas-Cárdenas *et al.*, 2015).

Un miRNA es un producto de ARN de 21 a 24 nucleótidos de un gen que no codifica proteínas. Las plantas, como los animales, tienen una gran cantidad de genes que codifican miRNA en sus genomas. Se ha predicho o confirmado que los miRNA de plantas regulan una variedad de procesos, como el desarrollo, el metabolismo y las respuestas al estrés (Vargas-Hernández *et al.*, 2020). Se ha predicho o confirmado que los miRNA de plantas regulan los genes que codifican varios tipos de proteínas regulatorias. Una categoría importante de genes blanco de los miRNA consiste en factores de transcripción u otras proteínas reguladoras que funcionan en el desarrollo de las plantas o transducción de señales (Zhang *et al.*, 2015). La primera evidencia de que los sRNA juegan un papel en el desarrollo de las plantas provino de mutantes con biogénesis o función alterada de sRNA (Zhang *et al.*, 2015).

2.4 miRNAs asociados a la maduración y desarrollo de frutos

Los miRNAs juegan una función reguladora vital en expresión de genes eucarióticos mediante la unión a genes diana y suprimiendo su expresión. La búsqueda de estas moléculas podría lograrse por clonación directa y análisis bioinformático, y cientos de

miRNAs han sido identificados en *Arabidopsis thaliana*, *Oryza sativa*, *Malus domestica*, *Zea mays*, *Solanum lycopersicum* y otras plantas (Zhang *et al*, 2015). Ya que, como con otros aspectos, no existe mucha información relacionada a los sRNA en la maduración de frutos, la principal estrategia es analizar y comparar los datos con secuencias ya reportadas para plantas modelo, tales como *Arabidopsis* y tomate. La identificación de miRNAs de no modelo organismos es a la vez práctico e instrumental para abordar Regulación génica guiada por miRNA.

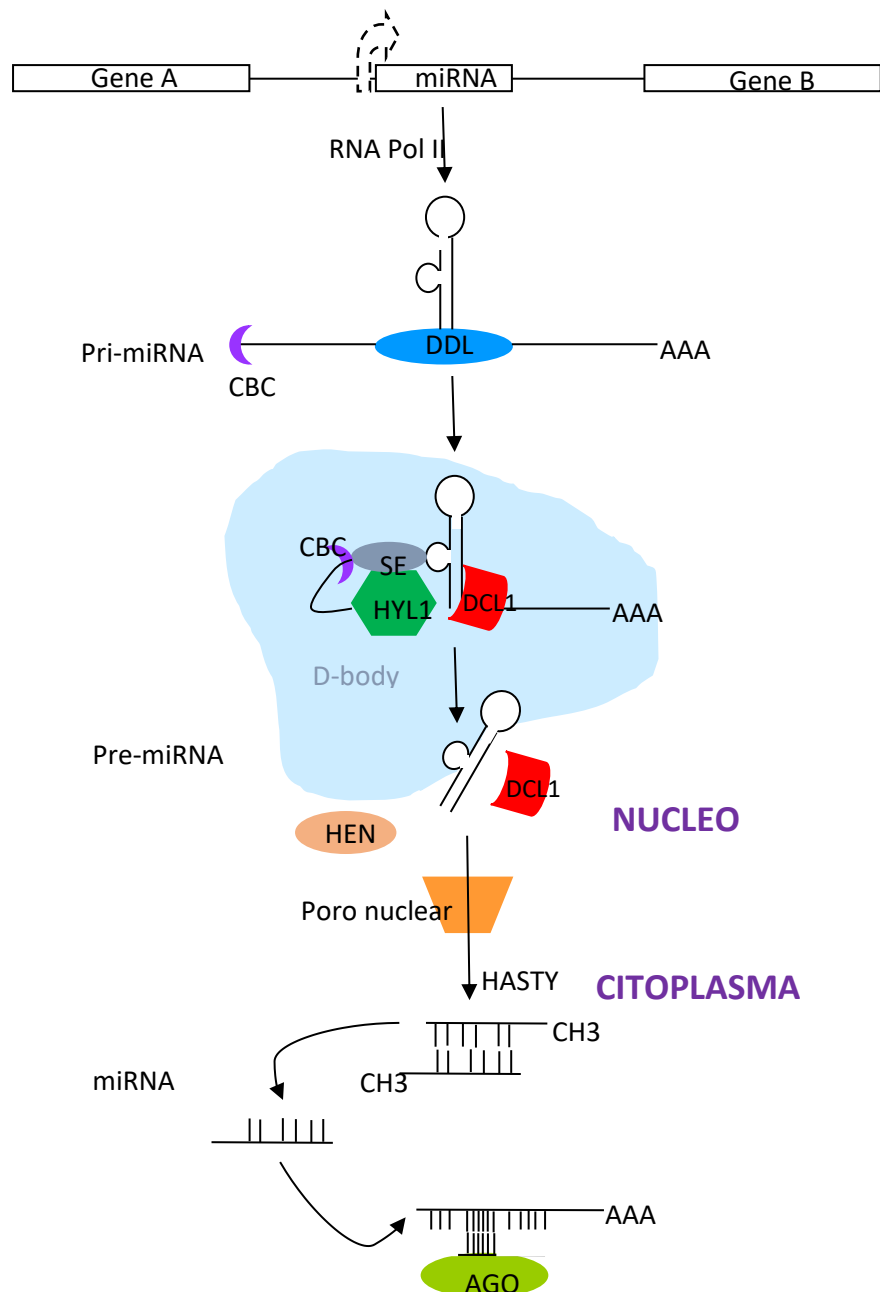


Figura 1. Biosíntesis de miRNAs en plantas. A partir de la síntesis del pri-miRNA se indica la participación de las diferentes proteínas del Complejo para la biosíntesis en núcleo y citoplasma: proteína Dawdle (DDL), complejo de unión (CBC), proteínas: Serrate (SE), Hyponastic leaves 1 (HYL1), Dicer-like 1 (DCL1), ortólogo de exportina 1 (HASTY), proteína para metilación (HEN1), y Argonauta (AGO).

Se han identificado y analizado varios miRNAs de diferentes frutos durante la maduración (Cuadro 2). El primer análisis relacionado con el estudio de miRNAs en frutos fue realizado por Han y Grierson (2002). Analizaron la presencia y propiedades de los ARN y transcripciones aberrantes en plantas de tomate transgénicas que exhiben silenciamiento postranscripcional de poligalacturonasa (PG) y un transgén homólogo truncado. En muchos de los estudios se han identificado familias comunes de miRNAs y sus blancos, entre los blancos se pueden observar familias de proteínas reguladoras asociadas mayormente a factores de transcripción relacionadas con el desarrollo (Cuadro 2).

Cuadro 2. microRNAs expresados en diferentes frutos.

Fruto	MicroRNAs expresados diferencialmente	Comportamiento de maduración	Blancos	Referencia
		Climatérico	SQUAMOSA (SPL), fCNR, SBP2, SIMYB, ARF, NAM, ATAF, CUC, NAC, AGO, APETALA 2 (AP2)	Arazy y Kedia, 2022
Melón	97 36 novedosos	Climatérico	AP2, ARF, GRF, TCP, NAC	Selinge <i>et al.</i> , 2020
Papaya	213 169 novedosos	Climatérico	ARF, ERF- RAP2, ABP	Cai <i>et al.</i> , 2021
Fresa	314 190 novedosos	No climatérico	MYB, SPL, NAC, TCP, ARF	Wang <i>et al.</i> , 2020
Uva	169 10 novedosos	No climatérico	Subunidad NF-Y, CSD, Helicasa de RNA, transportador de fosfato, GRAS	Guo <i>et al.</i> , 2018
Naranja	128 21 novedosos	No climatérico	GAMYBs, SPLs, and ATHB	Wu <i>et al.</i> , 2016
Chile	369 310 novedosos	No climatérico	NAC, ARF	López Ortiz <i>et al.</i> , 2021
Tuna	250 10 novedosos	No climatérico	MYB, SPL, NAC, TCP, ARF	Cedillo-Jiménez <i>et al.</i> , 2020

III. NOPAL TUNERO

Una característica importante de las tunas es que las diferentes variedades presentan un periodo diferente de maduración, esto es que existen variedades con un periodo de maduración corto, otras con un periodo de maduración intermedio y otras con un periodo de maduración prolongado. Esto hace un grupo de frutos atractivos para el análisis del proceso de maduración y las características asociadas a éste (Pimienta-Barrios, 1994). En términos de mejoramiento se han hecho intentos por lograr variedades con menor número de semillas, con mayor pigmentación y menor número de espinas y con una vida de almacén más larga. Existen muy pocos trabajos reportados para obtener materiales de nopal con las características citadas, de tal manera que la identificación de los elementos promotores de estas características será de gran atractivo para los programas de mejoramiento tradicionales o a través de biología molecular.

3.1 Secuenciación de genoma del nopal

El requisito para los programas modernos de mejoramiento vegetal, es la existencia de una secuencia genómica, si bien las plantas tienen genomas más complejos que los animales, las diferentes especies de vegetales tienen diferentes cantidades de ADN (Aramuganathan y Earle, 1991). Se ha estimado, y en algunas especies cuantificado, que el contenido de ADN de la mayoría de las plantas podría incluir desde 100 millones a 100 mil millones de letras (nucleótidos), que podrían estar organizadas en un rango de contenido 20.000 a 100.000 genes. Estimaciones tempranas indicaron que el genoma del nopal podría estar en el rango de 1 a 10 mil millones de nucleótidos (Paterson y Richardson, 1996). Con el desarrollo de nuevas estrategias y tecnologías para la secuenciación del genoma, es posible desarrollar programas para obtener un genoma parcial (transcriptoma) o un genoma completo (secuenciación del genoma completo) para organismos no convencionales, como *Opuntia* (Ekblom y Galindo, 2011).

La secuenciación del genoma de *Opuntia* ayudará a comprender los mecanismos de adaptación a diferentes ambientales, las implicaciones genéticas de la poliploidía, los enormes niveles de especiación, las implicaciones para la apomixis, maduración y desarrollo de frutos. Seguramente en los próximos años se dilucidará el genoma de *Opuntia*, pues ahora está en la lista de proyectos de genomas propuestos por algunos investigadores (Peng y H. Guo).

A la fecha los trabajos asociados con la secuenciación parcial o total del nopal tunero son muy limitados, se cuentan solo un par asociados al estudio de caracteres fisiológicos relacionados con la adaptación a condiciones de crecimiento extremas y con la regulación circadiana de plantas cultivadas bajo un régimen de día largo, enfocado en la característica como planta CAM (Mallona *et al.*, 2011). Este con tecnología EST (etiquetas de secuencias expresadas), en ambos casos las secuencias se ensamblaron, se compararon con secuencias en bases de datos de diferentes especies. Aunque está en marcha un programa para secuenciación del genoma del nopal (Peng y Guo, 2016), solo se ha reportado el genoma de cloroplastos actualmente (Köhler *et al.*, 2020).

3.2 Expresión de microRNAs en tuna

Se han establecido las metodologías para el análisis y expresión de los microRNAs en tuna y otros sistemas modelo para evaluar la actividad de los miRNAs (Rosas-Cardenas *et al.*, 2011; Rosas-Cárdenas *et al.*, 2015; Cruz-Hernández *et al.*, 2016, Cedillo-Jiménez *et al.*, 2016). Se identificaron 150 miRNAs con expresión en los diferentes estadios de desarrollo de la tuna, tras hibridar con microarreglos (Rosas-Cárdenas *et al.*, 2015; Cedillo-Jiménez *et al.*, 2016). Después de un análisis bioinformático se seleccionaron tres microRNAs conservados asociados al desarrollo del fruto, se analizó la expresión de estas moléculas pequeñas y se observó predominantemente en los primeros estadios del fruto, sugiriendo una participación activa en el desarrollo (Cruz-Hernández *et al.*, 2016, Cruz-Ramírez *et al.*, 2016 Cedillo-Jiménez *et al.*, 2020). Los microRNAs seleccionados son miR156, miR160 y miR397 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Perfil de miRNAs expresados diferencialmente en tuna y sus blancos.

miRNA	Flor	Fruto inmaduro	Fruto verde	Blanco/ Función posible
miRNA 159	++	+	+	Familia MYB Floración tardía
miRNA 165	++	+	+	Zipper de Leucina Mantenimiento de meristemo apical
miRNA 398	++	+	+	Superóxido dismutasa; ARGONAUTA Respuesta a estrés
miRNA 156	+	+++	+	Familia SPL Formación de semillas
miRNA 164	+	+++	+	Familias CUC, Nam Desarrollo reproductor
miRNA 168	+	+++	+	Argonauta Tiempo de floración
miRNA 170	+	++	+++	Familias SCL y HAM Desarrollo floral
miRNA 390	+	++	+++	Familia ARF Producción de auxinas, desarrollo de órganos
miRNA 482	-	++	+++	Complejo NBS-LRR Resistencia a patógenos
miRNA3636	-	++	+++	Metaloproteinasas Proliferación celular
miRNA822	-	-	+++	Proteínas DRB y DCL Producción de siRNAs

3.3 Conclusiones

Las condiciones óptimas para el primer análisis comparativo de microARN de fruto de tuna se establecieron utilizando características contrastantes de maduración de este fruto no-climatérico. Los perfiles de microarreglos mostraron cambios en el transcriptoma de miARN de frutos de tuna con maduraciones contrastantes y en diferentes estados de maduración.

Estos cambios revelaron la alta síntesis y el control diferencial de la expresión génica durante la maduración de los frutos de tuna. Identificamos microRNAs con actividades específicas, asociadas con la maduración de frutos.

En el futuro las herramientas para la generación de nuevos fenotipos de *Opuntia* será la expresión de miRNAs o siRNAs, en estos experimentos se reconocerá claramente el papel de diferentes moléculas o vías involucradas en la formación de semillas, retraso en la maduración o desarrollo de frutos, por ejemplo.

3.5 Agradecimientos

A la Universidad De La Salle Bajío y a la Red Nopal, por el apoyo para la realización de este trabajo.

IV. Literatura citada

- Ameres, S. L. y Zamore, P. D. 2013. Diversifying microRNA sequence and function. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 14:475- 488.
- Aramuganathan, K. y Earle, E. D. 1991. Nuclear DNA content of some important plant species. *Plant Mol. Biol. Rep.* 9: 208–218.
- Arazi, T. y Khedia, J. Tomato. 2022. MicroRNAs and Their Functions. *Int. J. Mol. Sci.* 2022, 23, 11979.
- Axtell, M. J. 2013. Classification and comparison of small RNAs from plants. *Ann. Rev. Plant Biol.* 64:137-159. DOI:10.1146/annurev-arplant-050312-120043
- Brady, J. 1987. Fruit ripening. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 38: 155–178.
- Cai, J.; Wu Z.; Hao Y.; Liu Y.; Song Z.; Chen W., Li X. y Zhu X. 2021. Small RNAs, Degradome, and Transcriptome Sequencing Provide Insights into Papaya Fruit Ripening Regulated by 1-MCP. *Foods* 2021, 10, 1643.
- Cedillo-Jiménez, C. A., Hernández-Salazar M., Escobar-Feregrino T., Caballero-Pérez J., Arteaga-Vázquez M., Cruz-Ramírez A., Torres-Pacheco I., Guevara-González R. y Cruz-Hernández A. 2016. MicroRNAs Sequencing for Understanding the Genetic Regulation of Plant Genomes. In: *Plant Genomes*. Intech Publishing.
- Cedillo-Jiménez, C. A., Cruz-Ramírez L. A., Mondragón-Jacobo C., Aguilar-Ruiz C. A., González-Márquez M. A., Arellano-Perusquia A. y Cruz-Hernández A. 2020. miRNAs involvement on fruit development in prickly pear (*Opuntia* sp.). *Acta Hort.* 1297.

- Cedillo-Jiménez, C. A.; Guevara González R. G., Feregrino-Perez A. A. y Cruz-Hernández A. 2020. MicroRNAs and target interaction during tomato fruit ripening: a review post miRBase v22 release. *Scientia Horticulturae Journal*. 270 (2020) 109435.
- Cruz-Hernández A. and Paredes-López O. 2012. Fruit quality: new insights for biotechnology. *Critical Reviews in Food Science Nutrition*. 52: 272-289. (Online 17 junio 2011).
- Cruz-Ramírez A., Herrera-Estrella L., Casas-Flores S., Escobar-Feregrino T., Arteaga-Vázquez M., Guevara González R., Torres-Pacheco I., Caballero Pérez J. y Cruz-Hernández A. 2016. miRNAs Analysis During Prickly Pear Development. *Acta Horticulturae* 1110: 99-103.
- Cuperus, J. T., Carbonell A, Fahlgren N., Garcia-Ruiz H., Burke R. T., Takeda A., Sullivan C. M., Gilbert S. D., Montgomery T. A. y Carrington J. C. 2010. Unique functionality of 22 nt miRNAs in triggering RDR6-dependent siRNA biogenesis from target transcripts in Arabidopsis. *Nat. Struct. Mol. Biol.* 17:997–1003.
- Eklom, R. y Galindo J. 2011. Applications of next generation sequencing in molecular ecology of non-model organisms. *Heredity* 107: 1–15.
- Giovannoni, J. 2001. Molecular biology of fruit maturation and ripening. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol Biol.* 52: 725–749.
- Guo, Q., Xiang A. L., Yang Q. y Yang, Z. M. 2007. Bioinformatic identification of microRNAs and their target genes from *Solanum tuberosum* expressed sequence tags. *Chinese Sci. Bull.* 52: 2380–2389.
- Han, Y. y Grierson, D. 2002. Relationship between small antisense RNAs and aberrant RNAs associated with sense transgene mediated gene silencing in tomato. *Plant J.* 29: 509–19.
- Jones-Rhoades M. W. 2012. Conservation and divergence in plant microRNAs. *Plant Mol. Biol.* 80:3–16.
- Jover-Gil S., Candela H., Robles P., Aguilera V., Barrero J. M., Micol J. L. y Ponce M. R.. 2012. The microRNA pathway genes AGO1, HEN1 and HYL1 participate in leaf proximal–distal, venation and stomatal patterning in Arabidopsis. *Plant Cell Physiol.* 53:1322-1333.
- Köhler, M., Reginato M., Souza-Chies T. T. y Majure L. C. 2020. Insights Into chloroplast genome evolution across Opuntioideae (Cactaceae) reveals robust yet sometimes conflicting phylogenetic topologies. *Front. Plant Sci.* 11:729.
- Lopez-Ortiz, C; Peña-García Y., Bhandari M., Abburi V. L., Natarajan P., Stommel J. Nimmakayala P. y Reddy U. K. 2021. Identification of miRNAs and Their Targets Involved in flower and fruit development across domesticated and wild capsicum species. *Int. J. Mol. Sci.* 22: 4866. DOI:
- Mallona, I., Egea-Cortines M., Weiss J. 2011. Conserved and divergent rhythms of crassulacean acid metabolism-related and core clock gene expression in the cactus *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiol.* 156: 1978–1989.
- Paterson, A. y Richardson C. 1996. Toward a cactus genome project: utilizing information from well studied model plants to map *Opuntia* chromosomes. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 1: 106–109.

- Peng, J. y Guo H.
- Pimienta-Barrios, E. 1994. Prickly pear (*Opuntia spp*): a valuable fruit crop for the semiarid lands of México. *J.Arid Environ.* 28 (1), 1–11.
- Pogue, A. I., Clement C., Hill J. M., Lukiw W. J. 2014. Evolution of microRNA (miRNA) Structure and Function in Plants and Animals: Relevance to Aging and Disease. *J Aging Sci.* 2: 119: 1-5. DOI:10.4172/2329-8847.1000119
- Rosas-Cárdenas. F. F., Durán-Figueroa N., Cruz-Hernández A., Marsch-Martínez N., y Stefan de Folter. 2011. Simple and efficient protocol for small RNA isolation from different plant species. *Plant Methods.* 7: 1-4. DOI:10.1186/1746-4811-7-4
- Rosas-Cárdenas, F., Escobar-Guzmán R., Cruz-Hernández A., Marsch-Martínez N. y De Folter S. 2015. An efficient method for miRNA detection and localization in crop plants. *Frontiers Plant Sci.* 6:99.
- Rosas-Cárdenas, F. F., Caballero-Pérez J., Gutiérrez-Ramos X., Marsch-Martínez N., Cruz-Hernández A. y de Folter S. 2014. miRNA expression during prickly pear cactus fruit development. *Planta.* DOI 10.1007/s00425-014-2193-0
- Selinge, B., Yunyun T., Chao T., Shunbuer B., Jinfeng H. y Agula H. 2021. Genome-wide identification of microRNAs involved in the regulation of fruit ripening and climacteric stages in melon (*Cucumis melo*). *Nature Horticulture Research.* 7:106
- Tieman, D., Zhu G., F. R. Marcio, Resende Jr., Lin T., Nguyen C., Bies D., Rambla J. L., Ortiz Beltran K. S., Taylor M., Zhang B., Ikeda H., Liu Z., Fisher J., Zemach I., Monforte A., Zamir D., Granell A., Kirst M., Huang S. y Klee H. 2017. A chemical genetic roadmap to improved tomato flavor. *Science.* 355: 391–394.
- Vaucheret H. 2015. Gene silencing: Mode of miRNA biogenesis matters. *Nat. Plants.*;1:475-483.
- Wu, J., Zheng S., Feng G. y Yi H. 2016. Comparative Analysis of miRNAs and Their Target Transcripts between a Spontaneous Late-Ripening Sweet Orange Mutant and Its Wild-Type Using Small RNA and Degradome Sequencing. *Front. Plant Sci.* 7:1416.
- Wang, Y., Li W., Chang H., Zhou J., Luo Y., Zhang K., Zuo J. y Wang B. 2020. sRNAome and transcriptome analysis provide insight into strawberry fruit ripening. *Genomics.* 112(3):2369-2378
- Zhang, H, Xia R., Meyers B. C. y Walbot V. 2015. Evolution, functions, and mysteries of plant ARGONAUTE proteins. *Curr. Opin. Plant Biol.* 27:84-90.
- Zhoubin, L., Zhang Y., Ou L. , Kang L., Liu Y., Lv J., Wei G., Yang B., Yang S., Chen W., Dai X., Li X., Zhou S., Zhang Z., Ma Y. y Zou X.. 2017. Identification and characterization of novel microRNAs for fruit development and quality in hot pepper (*Capsicum annuum* L.). *Gene.* 15; 608:66-72.

8. ESTRATEGIA POR PCR PARA DETERMINAR LA PRESENCIA DEL AGENTE CAUSAL DEL ENGROSAMIENTO DEL CLADODIO

¹De la Torre Pizaña M. Á., ¹Perales Segovia C., ¹Flores Benítez S., ¹Valera Montero L. L. y ¹Silos Espino H.

¹Laboratorio de Biotecnología Aplicada y Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales del Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes, km. 18 carr. Ags-S. L. P. El Llano Aguascalientes, México. C. P. 20330.

Correspondencia: SEH, ORCID: 0000-0002-4242-7593, hector.se@llano.tecnm.mx

Tema	Página
I. Resumen	140
II. Introducción	141
III. Materiales y métodos	141
3.1 Extracción de ADN genómico	141
3.2 Amplificación por PCR	141
3.3 Secuenciación de productos de PCR	142
IV. Resultados y discusión	142
4.1 Amplificación por PCR y análisis de secuencias	142
4.2 Secuenciación de productos de PCR y similitud de secuencias	144
4.3 Verificación con microscopía electrónica	145
4.4 Conclusiones	146
V. Literatura citada	146

I. Resumen

Mediante técnicas de PCR con iniciadores universales para el gen rRNA 16S y la región espaciadora 16S y 23S para fitoplasmas se logró la amplificación de un fragmento de 1200 pb. El alineamiento de las secuencias obtenidas mostró mayor similitud con dos especies de bacterias (*Staphylococcus* y *Masilia*) en tanto que los estudios de microscopía electrónica revelaron estructuras como cuerpos ovoides y elongados en células de tejido conductor que varían en tamaño desde 400 hasta 1800 nm en genotipos sintomáticos lo que coincide con reportes previos.

Palabras clave: *Opuntia*, fitoplasmas, engrosamiento del cladodio, PCR, microscopía electrónica.

II. Introducción

Varios estudios han referido una enfermedad conocida como ‘planta macho’ en nopal caracterizada por el engrosamiento de cladodios y la presencia de mosaicos, amarillamiento y deformación de los frutos relacionada con virus y fitoplasmas (Felker *et al.*, 2009; Franova, 2011; Fucicovsky *et al.*, 2011). Estos últimos microorganismos son patógenos de la clase *Mollicutes* considerados como agentes causales de más de 700 enfermedades en plantas encontrados de forma heterogénea en floema a menudo en bajas cantidades (Heinrichi *et al.*, 2001; Hernández *et al.*, 2009; Hodgetts *et al.*, 2007; Hogenhout *et al.*, 2010). Las malformaciones causadas por esta enfermedad han propiciado que se le considere una de las principales limitantes en la producción de frutos de nopal (Cai *et al.*, 2001). Aunado a lo anterior, un gran número de éstos fitoplasmas se encuentran asociados a plagas que atacan al cultivo como chinches del género *Chelinidea* sp., caracoles como *Helix aspersa* o a malezas asociadas a los cultivos como, *Argemone mexicana* y *Lupinus* sp. que son reservorios del fitoplasma áster amarillo 16Srl que produce síntomas de planta macho (Franova *et al.*, 2011; Lebsky *et al.*, 2010). Debido a que el cultivo *in vitro* de fitoplasmas aún no se ha logrado, la detección, identificación y clasificación de fitoplasmas se ha realizado mediante técnicas de PCR, RFLPs y análisis filogenéticos por comparación del 16S rRNA (Lee *et al.*, 1993); así, trabajos como el de Hernández *et al.*, (2009) han podido corroborar que los síntomas de engrosamiento están relacionados con la presencia del fitoplasmas. Debido a que la sintomatología provocada por fitoplasmas puede ser el resultado de una coinfección por virus hace que la identificación de la presencia de fitoplasmas basado en la morfología de los cultivos no sea precisa, lo cual aumenta la posibilidades de diseminación del patógeno debido a la ausencia de métodos profilácticos (Harrison *et al.*, 2002). Por lo tanto, en esta investigación se determinó el grado de incidencia y severidad del “engrosamiento del cladodio” en huertas con diferentes genotipos de nopal tunero, se relacionaron los síntomas con resultados de PCR anidada en cladodios (con y sin síntomas) e insectos asociados al cultivo y finalmente se utilizó microscopía electrónica de transferencia para confirmar el agente causal de la enfermedad.

III. Materiales y métodos

3.1 Extracción de ADN genómico

A partir de 200 mg de tejido vegetal y de insectos se extrajo ADN genómico mediante el método de Doyle (1991). Se extrajo material genético tanto de nopal silvestre como de material cultivado (sintomáticas y asintomáticas), además se incluyeron tres muestras de nopales provenientes del estado de Puebla, una muestra de nopal obtenido por cultivo *in vitro* a partir de semillas como control negativo, por las condiciones asépticas en las que se desarrolla y ADN de vinca (*Catharanthus roseus*) como control positivo debido a que es un hospedero natural de fitoplasmas, dando un total de 33 muestras seleccionadas.

3.2 Amplificación por PCR

Con el ADN de cada una de las muestras se realizó la PCR directa utilizando los iniciadores universales reportados por Fucicovsky *et al.*, (2011); P1 (5'-AAGAGTTTGATCCTGGCTCAGGATT-3') y Tint (5'-TCA GGC GTG TGC TCT AAC CAG C -3') para la amplificación del gen rRNA 16S y la región espaciadora 16S y 23S (Seemuller *et al.*, 1998). La mezcla de reacción se llevó a un volumen final de 12.5 µl con

6.25 µl del buffer de PCR del *kit* GoTaq® Green Master Mix 2X (Promega), 0.5 µl de cada iniciador (20 pM), 2.75 µl de ADN problema a partir de una dilución 5/10 y 2.5 µl de agua ultrapura. Para la PCR anidada se emplearon los iniciadores 16F2n (5'-GAAACGACTGCTAAGACTGG-3') y R16R2 (5'-TGACGGGCGGTGTGTACAAACCCCG-3') reportados por Lee *et al.*, (1993). Se realizó una dilución de 1:30 del producto de PCR directa, se tomaron 2.5 µL de esta dilución como molde para un volumen final de 12.5µl, las concentraciones de iniciadores fueron las mismas que en la PCR anterior. El programa de amplificación consistió de 1 ciclo de desnaturalización a 94 °C durante 1 min, seguido de 35 ciclos a 94 °C durante 1 min 55 °C durante 2 min y 72 °C durante 3 min, con 1 ciclo de extensión final a 72 °C durante 10 min (Smart *et al.*, 1996). Los productos amplificados fueron analizados por electroforesis en buffer TBE 1X en gel de agarosa 1.2% a 120 V por 50 min.

3.3 Secuenciación de productos de PCR

Nueve productos de PCR que corresponden a seis plantas de nopal sintomáticas, dos asintomáticas y uno de insectos (*Dactylopius coccus*) fueron secuenciados en el Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LANBAMA) del IPICYT, en San Luis Potosí, Méx.

IV. Resultados y discusión

4.1 Amplificación por PCR y análisis de secuencias

Mediante PCR anidada se lograron amplificar fragmentos de 1200 y otros de tamaño variable (600 pb, 800 pb y 1100 pb) para casi todas las muestras de nopal analizadas (indicativo específico de la presencia de la enfermedad), a excepción del genotipo Picochulo de la región de Buenavista Pinos, Zac. y Burrón de la región de La Montesa Pinos Zac. (Figura 1 A, carriles 1 y 13), lo cual pudo deberse a la poca cantidad y calidad del ADN. Los productos amplificados de tamaño variable son originados posiblemente porque los iniciadores utilizados no son específicos, o por la transición entre cladodio joven y viejo como lo reportan Fucikovsky *et al.*, (2011) al amplificar fragmentos de entre 914 y 1233 pb en cladodios y de 454 pb a partir de semillas de nopal con los mismos iniciadores. Este reporte se suma a publicaciones previas de aparición de bandas inespecíficas al detectar la presencia de fitoplasmas en otras plantas (Reddy, 2001; Suaste *et al.*, 2012). Es conveniente mencionar que aun cuando las plantas no mostraban síntomas del “engrosamiento del cladodio”, las muestras resultaron positivas (Figura 1 A). Para confirmar la confiabilidad de la amplificación de fragmentos, se utilizaron controles positivos (Figura 1 B, carril 32) y negativos (Figura 1 B, carril 34), en este caso la vinca (*Catharanthus roseus*) y la planta de nopal germinado y propagada *in vitro* respectivamente, los cuales se mostraron acorde a lo esperado. Los resultados de este trabajo muestran que plantas sintomáticas y asintomáticas presentan presencia de fitoplasmas, lo cual coincide con lo reportado previamente en plantas de nopal. También, en plantas provenientes de otra región productora de nopal alejada de la zona de estudio, se mostraron como positivas, lo cual indica que la presencia del “engrosamiento del cladodio” lo tenemos ampliamente diseminado en el país (Figura 1 B, carriles 23, 24 y 25), inclusive coexiste en plantas silvestres como los genotipos Xoconostle y Anaranjado (Figura 1 B, carril 28 y 29), los cuales generalmente no presentan síntomas. Esto último permite inferir que un manejo “adecuado” de las plantas cultivadas propicia el desarrollo del “engrosamiento del cladodio”.

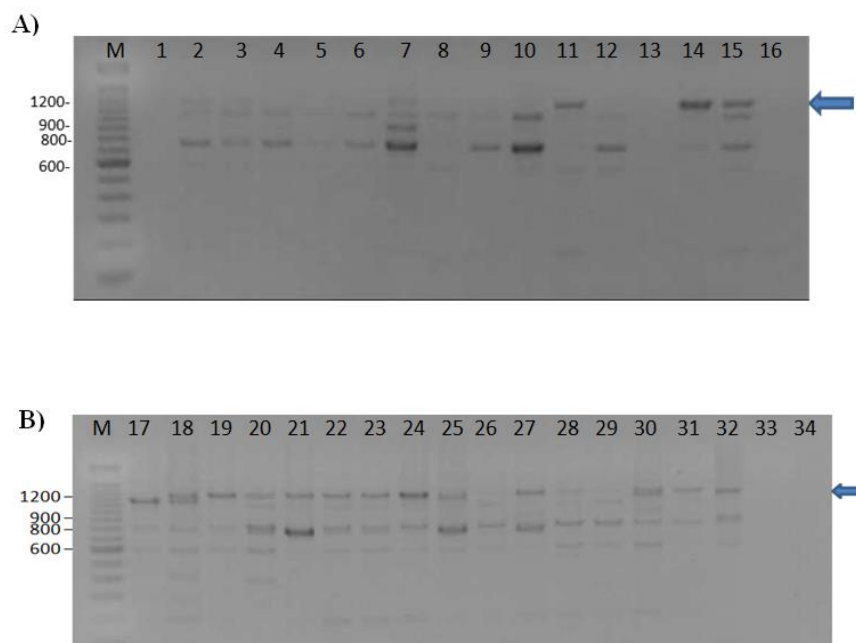


Figura 1. Detección del “engrosamiento del cladodio” en nopal (*Opuntia* spp.) por medio de PCR anidada. A) Genotipos asintomáticos: 1 y 8: Picochulo/Buena Vista, 2: Amarillo/La Montesa, 3: Burróna/La Montesa, 4: Copena/San Francisco de los Romo, 5: Amarillo /Matancillas, 6: Burróna/El Sitio, Zac. y 7: Burróna/Villa de Arriaga. Genotipos sintomáticos, 9, 10 y 11: Picochulo/Buena Vista, 12: Burróna/Buena Vista, 13: Burróna/ La Montesa, 14 y 15: Copena/ San Francisco, 16: Control negativo (agua estéril). B) Genotipos sintomáticos: 17: Copena/San Francisco, 18: Burróna/Matancillas, 19: Amarillo/Matancillas, 20 y 21: Burróna/El Sitio, 22: Burróna/Villa de Arriaga, 23 y 24: Camuesa/Puebla. Silvestres, 25: Camuesa/Puebla, 26: Burróna, 27: Camuesa, 28: Xoconostle, 29: Cardón, 30: Anaranjado, 31: Tapón, 32: Control positivo (Vinca), 33: agua estéril y 34: nopal *in vitro*, M: Marcador de peso molecular 1kb.

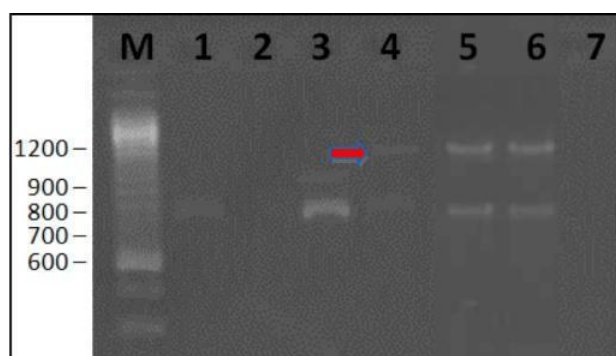


Figura 2. Detección del agente causal del “engrosamiento del cladodio” en insectos plaga del nopal por medio de PCR anidada. Insecto/genotipo/localidad. 1: Chinche/Copena/San Francisco de los Romo, 2: Chinche/Burróna/Matancillas, 3 y 4: Chinche/Burróna/El Sitio, 5 y 6: Cochinilla/Copena/San Francisco de los Romo y 7: Agua estéril (Control negativo). M: Marcador de peso molecular 1 kb.

En el análisis molecular mediante PCR obtenido de insectos asociados a los cultivos de nopal, se obtuvieron cinco muestras positivas amplificándose el fragmento característico de 1200 pb (Figura 2), cuatro de ellas corresponden a chinches asociados a los genotipos Copena y Burróna y dos a grana cochinilla asociada a los mismos genotipos en diferentes sitios de colecta. Esto coincide con reportes previos que muestran a la grana cochinilla como vector de fitoplasmas (Noe-Carranza *et al.*, 2009; Suaste *et al.*, 2012); por otro lado insectos tipo chinches del género *Chelinidea* sp. han sido reportados como un fuerte vector de fitoplasmas (Wientraub y Beanland, 2006); por su parte Fucikovsky *et al.*, 2011) encontró la presencia de fitoplasmas en insectos *Chelinidea* sp. y *Helix aspersa*.

4.2 Secuenciación de productos de PCR y similitud de secuencias.

Seis productos de PCR de 1200 obtenidos de muestras de nopal y uno del insecto cochinilla fueron secuenciados y analizados en BLAST para buscar correspondencias entre secuencias encontradas en este estudio con aquellas reportadas para fitoplasmas de diferentes organismos en el banco de genes. Los resultados indican que no hay relación de las secuencias obtenidas con fitoplasmas, sin embargo, se encontró alta similitud con los géneros *Staphylococcus*, *Massilia*, *Hydrocoryne*, *Rhodocyclaceae* (Cuadro 4).

Cuadro 4. Porcentaje de identidad de los fragmentos de ADN obtenidos con los iniciadores P1-Tint 1 y 16F2n-R16R2 en genotipos de nopal e insecto cochinilla en comparación con secuencias reportadas en la base de datos GeneBank para otros organismos.

Genotipos e insecto	Tamaño de secuencia obtenida	Correspondencia en BLAST	Puntuación máxima	Identidad	Valor -E	Accesión
Burróna	1195	<i>Massilia</i> sp.16S RNA gene	1572	92%	0.	JQ977476
Copena	1208	<i>Staphylococcus epidermidis</i> 16S RNA gene	2198	99%	0.	HQ011917
Copena	812	<i>Staphylococcus epidermidis</i> 16S RNA gene	1491	99%	0.	KF254632
Cochinilla	440	Uncultured bacterium 16S RNA gene	704	96%	0.	GQ031466
Burróna	323	<i>Massilia timonae</i> 16S rRNA gene	566	99%	5e-158	HG008809
Burróna	227	<i>Hydrocoryne</i> sp. 16S RNA gene	363	97%	5e-97	KC346268
Burróna	441	<i>Staphylococcaceae</i> bacterium 16S RNA gene	723	97%	0.	AY841363
Copena	784	Uncultured <i>Rhodocyclaceae</i> bacterium 16S RNA gene	1282	98%	0.	JQ278757
Burróna	524	<i>Massilia</i> sp. 16S RNA gene	929	99%	0.	JQ977476
Burróna	564	<i>Staphylococcus</i> sp. 16S rRNA gene	1016	99%	0.	AJ746143
Burróna	604	Uncultured <i>Staphylococcus</i> sp. 16S RNA gene	1057	98%	0.	HM076695

4.3 Verificación con microscopía electrónica

En la Figura 3a se observa un tejido de conducción de cladodio de nopal asintomático libre de “microorganismos”. De la Figura 3b a la 3e se observan secuencialmente de menor a mayor amplitud, las diferentes estructuras detectadas con microscopía electrónica de barrido, unas de ellas semejantes a las obtenidas por Chen *et al.*, (2009) y Lebsky *et al.*, 2010) en tejido del floema en líneas de papaya Maradol y cítricos respectivamente, donde los describen como organismos tipo fitoplasmas esféricos de tamaño variable (500 a 1800 nm), que aparecen como células individuales o partículas agrupadas. También se observan otras estructuras cilíndricas de mayor tamaño (10 μ m) y otras que forman una red. Con la microscopía electrónica de transmisión se observaron de manera sobresaliente, dos estructuras, una correspondiente a varillas alargadas de una amplitud aproximada de 100 nm y longitud no determinada (Figura 3g) y otra estructura en forma de varilla en forma de espiral de mayor grosor y menor longitud que la anterior (Figura 3h y 3i). De acuerdo con los resultados obtenidos entre los síntomas del “engrosamiento del cladodio”, las pruebas moleculares, la microscopía electrónica y las condiciones en que se desarrollan los genotipos de nopal analizados, consideramos que el “engrosamiento” es el desarrollo óptimo de microorganismos que coexisten con el nopal y que bajo circunstancias propicias de cultivo (destrucción de microflora y microfauna del suelo, altas dosis de fertilización, alto nivel de humedad, presencia de plagas, y aplicación de abono orgánico no compostado) desencadena un crecimiento descontrolado en la planta con las consecuencias ya conocidas.

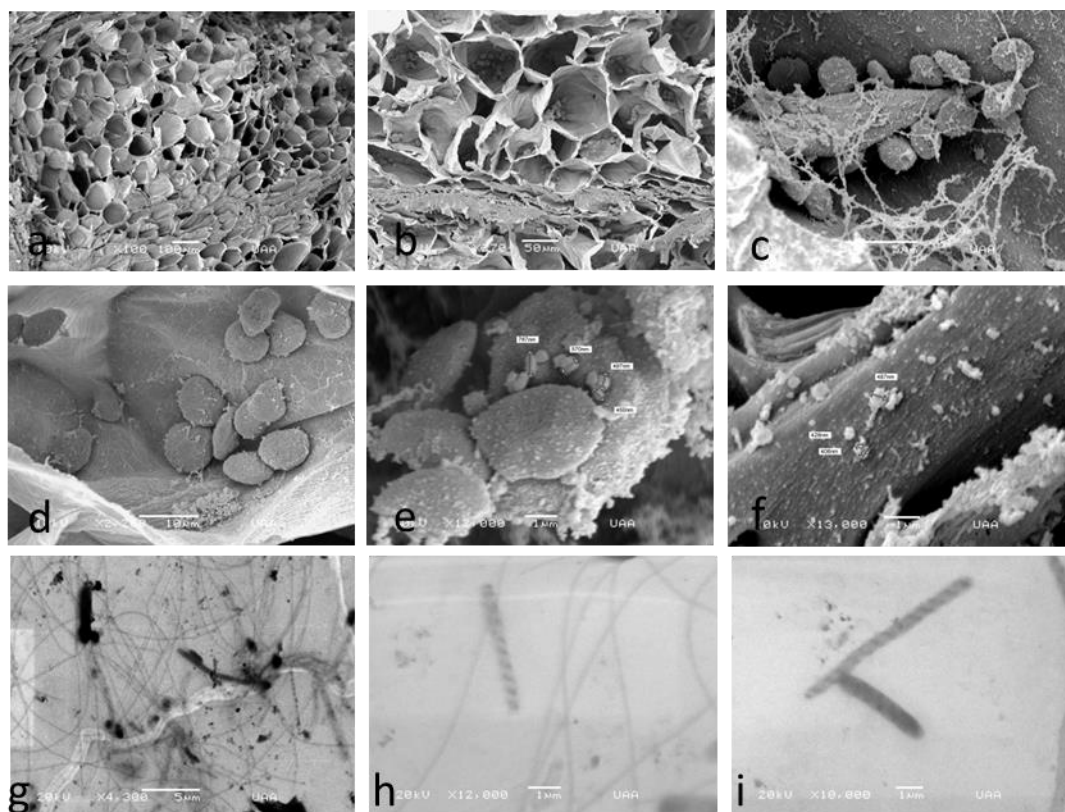


Figura 3. Microscopía electrónica de barrido (a-f) y de transmisión (h-i) en tejido de nopal asintomático (a) y con síntomas de “engrosamiento del cladodio”. a) 100x, b) 270x, c) 850x, d) 1500x, e) 12000x, f) 13000x, g) 4300x, h) 10000x e i) 12000x.

4.4 Conclusiones

Mediante pruebas moleculares no fue posible verificar fehacientemente la presencia de fitoplasmas en muestras provenientes de plantas de nopal e insectos, sin embargo, la secuenciación de fragmentos generados con los iniciadores recomendados, mostraron mayor similitud con bacterias, sugiriendo que los iniciadores utilizados en este estudio y en investigaciones previas podrían no ser específicos para fitoplasmas al amplificar regiones conservadas del 16SrRNA y compartidas por ambos microorganismos. Las imágenes obtenidas por microscopía electrónica confirman la presencia de fitoplasmas y otros microorganismos en cultivares de nopal con “engrosamiento del cladodio”, enfermedad que se considera la principal limitante de producción de nopal verdura y frutos en México. Considerando lo anterior y al tipo de propagación del nopal para establecer nuevos huertos se precisa de integrar un programa nacional de saneamiento para una mayor seguridad y rentabilidad del cultivo.

V. Literatura citada

- Bertaccini, A., A. Calari y P. Felker. 2007. Developing a method for phytoplasma identification in cactus pear samples from California. *Bulletin of Insectology*. 60(2): 257.
- Cai, H., Li, Kong B. y Chen H. 2001. Cloning and sequencing of 16S rRNA gene of Phytoplasma CWB1 strain associated with cactus witches' broom. *Wei Sheng Wu Xue Bao*. 41(6): 693-8.
- Chen, J., Pu X., . Deng S. Liu, Li H. y. Civerolo E. 2009. A Phytoplasma Related to 'Candidatus Phytoplasma asteris' Detected in Citrus Showing Huanglongbing (Yellow Shoot Disease) Symptoms in Guangdong, PR China. *Phytopathology*. 99(3): 236-242
- Doyle, J. 1991. DNA protocols for plants: CTAB total DNA isolation. 283-293. In: Hewitt, G.M.; Johnston, A., eds. *Molecular techniques in taxonomy*. Springer, Berlin, Germany.
- Felker, P., Bunch R., Russo G. y Tine J. A. 2009. Progreso en la identificación del agente causal de “Engrosamiento del cladodios o macho”. *Producción y aprovechamiento del Nopal*. Revista Salud Pública y Nutrición. 5 Edición especial: 37-47.
- Franova, J. 2011. Difficulties with conventional phytoplasma diagnostic using PCR/RFLP analyses. in *Bulletin of Insectology*. 64 supplement:S287-S288.
- Fucikovsky, Z. L., Yantilde M. J., Alanis-Martinez I. y Gonzalez-Perez E. 2011. New hosts of 16SrI phytoplasma group associated with edible *Opuntia ficus-indica* crop and its pests in Mexico. *African Journal of Microbiology Research*. 5(8): 910-918.
- Harrison, N., Myrie W., Jones P., Carpio M., Castillo M., Doyle M. y Oropeza C. 2002. 16S rRNA interoperon sequence heterogeneity distinguishes strain populations of palm lethal yellowing phytoplasma in the Caribbean region. *Annals of Applied Biology*. 141(2): 183-193.
- Heinrich, M., S. Botti, Caprara L., Arthofer W., Strommer S., Hanzer V., Katinger H., Bertaccini A., Machado M. L. D.C. 2001. Improved detection methods for fruit tree phytoplasmas. *Plant Molecular Biology Reporter*. 19(2): 169-179.

- Hernández, P.R., Noa-Carrazana J., C., Gaspar R., Mata P., y Flores E, N. 2009. Detection of phytoplasma on indian fig (*Opuntia ficus-indica* Mill) in Mexico central region. OnLine Journal of Biological Sciences. 9(3): p. 62.
- Hodgetts, J., Ball T., Boonham N., Mumford R. y Dickinson M. 2007. Use of terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) for identification of phytoplasmas in plants. Plant Pathology. 56(3): 357-365.
- Hogenhout, S.A. y Segura M. 2010. Phytoplasma genomics, from sequencing to comparative and functional genomics-what have we learnt?. pp 19. In: Phytoplasmas: genomes, plant hosts and vectors. Vol. I. CAB International. Cambridge, Massachussets USA, 331 p.
- Lebsky, V., Poghosyan A. y Silva-Rosales L. 2010. Application of scanning electron microscopy for diagnosing phytoplasmas in single and mixed (virus-phytoplasma) infection in Papaya. Julius-Kühn-Archiv. (427): S. 70.
- Lee, I.-M., Hammond R., Davis R. y Gundersen D. 1993. Universal amplification and analysis of pathogen 16S rDNA for classification and identification of mycoplasma-like organisms. Phytopathology. 83(8): 834-842.
- Noa-Carrazana, J. C., Gaspar R. y Mata P. 2009. Detection of phytoplasma on indian fig (*Opuntia ficus-indica* Mill) in Mexico central region. OnLine Journal of Biological Sciences. 9(3): p. 62.
- Seemüller, E., Marcone C., Lauer U., Ragozzino A. y Göschl M. 1998. Current status of molecular classification of the phytoplasmas. Journal of Plant Pathology. 3-26.
- SIAP. 2010. Cierre de la producción agrícola por estado, in Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México.
- Smart, C., Schneider B. Blomquist C., Guerra L., Harrison N., Ahrens U., Lorenz K., Seemüller, E. y Kirkpatrick B. 1996. Phytoplasma-specific PCR primers based on sequences of the 16S-23S rRNA spacer region. Applied and environmental microbiology. 62(8): 2988-2993.
- Reddy, K. 2001. Electron microscopy and molecular characterization of phytoplasmas associated with little leaf disease of brinjal (*Solanum melongena* L.) and periwinkle (*Catharanthus roseus*) in Bangladesh. Journal of Phytopathology. 149(5): 237-244.
- SIAP. 2009. *Producción Agrícola, ciclos perennes de nopales*. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México.
- Suaste, D. A., Rojas M. R. Zavaleta M. E. y Pérez B.. 2012. Detección molecular de Fitoplasmas en nopal tunero (*Opuntia ficus-indica*) con síntomas de engrosamiento del cladodio. Revista Mexicana de Fitopatología. 30(1): 72-80.
- Wei, W., Kawakita H. y Sato M. 2000. Detection of a small population of mulberry dwarf (MD)-phytoplasmas in symptomless-mulberry trees by nested PCR. Journal of Sericultural Science of Japan (Japan). 90(8): 909-914.
- Weintraub, P. G. y Beanland L. 2006. Insect vectors of phytoplasmas. Annu. Rev. Entomol. 51: 91-111.

Sección: Cultivo de tejidos vegetales del nopal



9. PROPAGACIÓN *IN VITRO* DE DOS VARIEDADES DE NOPAL *OPUNTIA FICUS INDICA* L.

¹Ojeda-Zacarías Ma. del C. y ²Pérez Sánchez R. E.

¹Universidad Autónoma de Nuvo León, Facultad de Agronomía Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda El Canada, Gral. Escobedo, Nuevo León. P.C. 66054. México.

²Universidad Michoacana de San Nicolas of Hidalgo, Facultad de Farmacobiología clínica, Izintzuntzan 173, Matamoros. C.P. 58240. Morelia, Michoacán, México.

Correspondencia: OZMD, ORCID: 0000-0002-0003-3705, maria.ojedazc@uanl.edu.mx

Tema	Página
I. Resumen.	149
II. Introducción .	150
III. Materiales y métodos.	151
3.1 Material vegetal y su acondicionamiento.	151
3.2 Establecimiento aséptico de los materiales vegetales.	152
3.3 Introducción de brotes.	153
3.4 Multiplicación <i>in vitro</i> de brotes de los genotipos.	153
3.5 Enraizamiento de brotes regenerados <i>in vitro</i> de los genotipos.	153
IV. Resultados y discusiones.	154
4.1 Establecimiento aséptico de los explantes.	154
4.2 Inducción de brotes.	154
4.3 Multiplicación <i>in vitro</i> de brotes de los genotipos.	154
4.4 Enraizamiento de brotes regenerados <i>in vitro</i> de ambas variedades.	155
4.5 Conclusiones.	156
V. Literatura citada.	156

I. RESUMEN

Opuntia es una especie de rápida adaptación a diversas condiciones climáticas y edáficas puesto que puede ser introducida a cualquier región del país, ya sea en climas templados-secos, áridos y semiáridos. Entre sus principales funciones son utilizadas para proteger el suelo de la erosión y restauración de otros. Además; es una planta que produce frutos y cladodios comestibles, que pueden ser utilizados como verdura o forraje. Por lo que; Se desarrolló la propagación *in vitro* de dos cultivares de nopal *Opuntia ficus indica* L. que permita su multiplicación y resguardo en condiciones *in vitro*. Se inició con el establecimiento de las areolas de cladodios de 8 a 12 cm de longitud, consecutivamente se desarrollaron todas las etapas que comprende la técnica de la micropropagación hasta el enraizamiento de los brotes regenerados *in vitro*. La técnica de desinfestación utilizada permitió el establecimiento *in vitro* de los explantes, mientras que, para la multiplicación y enraizamiento de brotes, se lograron obtener en las sales básicas de Murashige-Skoog (1962) (MS) más 6-bencil-amino-purina (BAP) con 3.0 mg L⁻¹ y ácido Naftalan-acético

(NAA) 1.0 mg L⁻¹ más fosfato diácido de sodio (NaH₂PO₄) 170 mg L⁻¹. La mejor respuesta se obtuvo en la variedad Jalpa con un promedio de 12.20 brotes, mientras que para liso forrajero fue de 10.10. El enraizamiento se obtuvo simultáneamente en las mismas condiciones de cultivo de la multiplicación de brotes. Por lo que, el balance hormonal utilizado permitió la regeneración de brotes en ambas variedades de la especie.

Palabras claves: *Cactácea*, micropropagación, BAP, NAA, protocolo.

II. Introducción

El nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) es una especie de rápida adaptación a diversas condiciones climáticas y edáficas puesto que puede ser introducida a cualquier región del país, ya sea en climas templados-secos, áridos y semiáridos. Entre sus principales funciones son utilizadas para proteger el suelo de la erosión y restauración de otros ya degradados. Es una planta que produce frutos y cladodios comestibles, que pueden ser utilizados como verdura o forraje durante los períodos de sequía (Le Houérou, 2000; Juárez y passea, 2002). Ofreciendo posibilidades excepcionales para una gran cantidad de biomasa en zonas de escasez de agua que son útiles para la alimentación del ganado (Felker *et al.*, 2006). Por otro lado, destaca el uso medicinal posee propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, hipoglucémicas, hipocolesteromiantes, antimicrobianas y neuroprotectoras. El tallo del nopal presenta una gran cantidad de compuestos bioactivos con capacidad antioxidante entre los cuales se incluyen fenólicos, flavonoides, carotenos y vitamina C Ginestra *et al.*, 2009; Bensadón *et al.*, 2010; Jeon *et al.*, 2011; Santos-Zea *et al.*, 2011). Estos compuestos químicos son una fuente importante de moléculas funcionales de importancia como medicamentos (Goossens *et al.*, 2003), sin embargo, la producción de éstos en la planta es muy baja, esto depende de la especie, condiciones de crecimiento, etapa de desarrollo, y aspectos fisiológicos (Guevara- Figueroa *et al.*, 2010).

En agricultura se pueden establecer programas de conservación para especies de interés agronómico primario, cuyo valor económico es muy alto y exigen un control de su biodiversidad; dichos programas pueden realizarse en dos modalidades complementarias: in situ y ex situ (Echenique *et al.*, 2004; Seguel, 2001). Los bancos de germoplasma in situ traen consigo riesgos, los cuales resultan ser una herramienta muy costosa económicamente, requiere de cuidado especial contra desastres naturales o enemigos potenciales patológicos, siendo además necesario tener un control absoluto en su programa de reproducción que no resulte contraproducente a las metas de conservación. Aunque la conservación del hábitat será siempre lo más crítico en el mantenimiento del máximo nivel de la diversidad vegetal. El uso de la biotecnología vegetal es la disciplina que más desarrollo ha demostrado en los últimos años. Actualmente ofrece una alternativa real para la resolución de un gran número de problemas relacionados con el mejor aprovechamiento de las plantas por parte del hombre.

El cultivo de tejidos vegetales es una herramienta que se ha utilizado con éxito para la conservación de germoplasma. Todas las especies tienen diferente potencial de regeneración incluso entre la misma especie. Por lo que es necesario establecer técnicas de propagación que permitan incrementar la disponibilidad del material vegetal, ajustando protocolos de regeneración para cada especie en particular ya que existe el problema de

que algunas son consideradas como recalcitrantes. Generalmente las plantas CAM son de crecimiento lento que a veces tienen capacidades reproductivas limitadas. Por lo que; la propagación *in vitro* por cultivo de tejidos es una opción viable para la multiplicación rápida y mantenimiento de germoplasma (Johnson y Emino, 1979). El cultivo de tejidos ya ha demostrado ser exitoso para varios géneros de la familia Cactaceae (Mauseth, 1979; Escobar *et al.*, 1986; Clayton *et al.*, 1990; Hubstenberger *et al.*, 1992). Por lo mencionado con anterioridad; Se desarrolló la propagación *in vitro* de dos cultivares de nopal (*Opuntia ficus indica* L.) que permita su multiplicación y resguardo en condiciones *in vitro*.

Los objetivos específicos fueron:

- Seleccionar el agente desinfectante y dosis que permita el establecimiento aséptico.
- Evaluar la dosis hormonal en el establecimiento *in vitro* de los cultivares vegetales.
- Evaluar regulador de crecimiento y concentración en la multiplicación y enraizamiento de brotes
- Valorar los sustratos en la aclimatación de plántulas regeneradas.

III. Materiales y métodos

3.1 Material vegetal y su acondicionamiento

Los cultivares utilizados fueron donados del banco de germoplasma de la facultad de Agronomía de la unidad academia Marín, N.L. Los cultivares del género *Opuntia* utilizados fueron (Jalpa y Liso forrajero), los cuales fueron crecidos en cubetas de 20 litros y colocadas a cielo abierto, se les aplicó a los cladodios 2.0 mg L^{-1} de BAP cada 15 días durante 45 días antes del establecimiento *in vitro*, con la finalidad de ayudar a activar la brotación de los cladodios y se les aplicó una solución fúngica a razón de Antrak 2.0 g L^{-1} . 15 días antes del establecimiento *in vitro*, con la finalidad de reducir la carga microbiana que traen endógenamente los tejidos vegetales.



Figura 1. Cladodios de 8 a 12 cm de longitud de ambas variedades, a) Jalpa y b) Liso forrajero.

3.2 Establecimiento aséptico de los materiales vegetales.

Se seleccionaron cladodios de 8 a 12 cm de longitud los cuales se lavaron con agua potable, y se pasaron por una solución fúngica a razón de Antrak 2.0 gL⁻¹ durante dos horas y en agitación. Posteriormente la desinfestación del material vegetal, se realizó en condiciones asépticas bajo una campana de flujo laminar, con (NaClO cloralex® al 6 % de Cl activo) más 0.01 % de Polyoxyethylene Sorbitan Monolaurate Tween-20, se preparó una solución a razón 20 % por 10 min. (v/v), seguido de tres enjuagues con agua estéril, por último, el material vegetal se colocó en una solución antioxidante conformada por la combinación de ácido ascórbico 400 mg L⁻¹, PPM 2.5 ml L⁻¹ y sacarosa 30 g L⁻¹ en esta solución permanecieron durante el establecimiento de la siembra, además los cortes se realizaron bajo la solución antioxidante, se cortaron piezas de aproximadamente un cm² con una aréola y se sembraron 10 explantes por caja magenta que contenían 30 ml de medio nutritivo, se utilizaron las sales básicas del medio (MS) más 6-bencil-amino-purina (BAP) 1.0 mg L⁻¹ y vitaminas, con 4.4 g L⁻¹ de Phytigel y se ajustó un pH de 5.5 previamente esterilizado a 121 °C, durante 15 min. Concluida la siembra las unidades experimentales fueron crecidas en condiciones controladas de fotoperiodo y temperatura de 16 horas luz, 8 de oscuridad y temperatura de 25 °C ± 2. Y colocadas bajo un diseño completamente al azar, se establecieron 10 repeticiones por genotipo. La variable evaluada fue: asepsia, oxidación y supervivencia, en estas condiciones los explantes permanecieron por cuatro semanas.

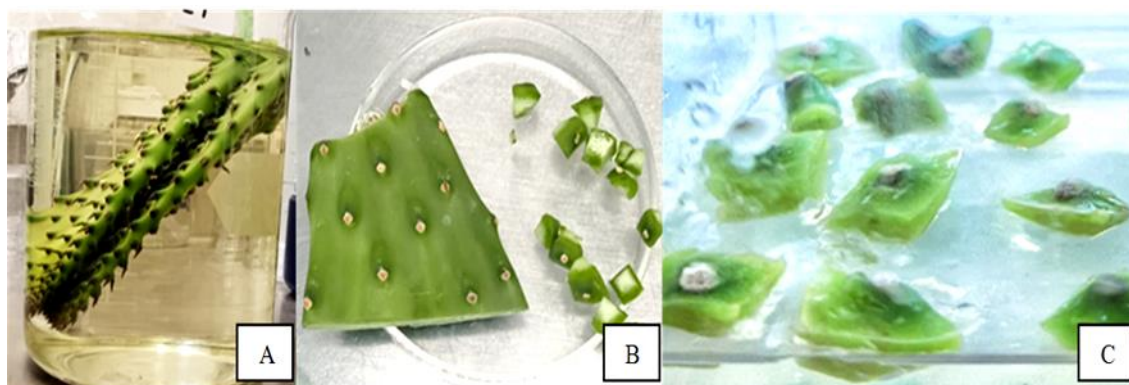


Figura 2. Pasos del proceso de desinfestación de los cladodios bajo la campana de flujo laminar hasta el establecimiento en los medios de cultivo, A) Cladodios en el agente desinfectante, B) Decisión de las areolas, C) Establecimiento de areolas en el medio de cultivo.

3.3 Inducción de Brotes

En esta etapa los explantes se establecieron en las sales básicas del medio (MS) suplementado con 1.0 mg L⁻¹ de BAP más vitaminas a razón de 100 mg L⁻¹ de myo-inositol, 0.001 mg L⁻¹ de ácido nicotínico, 0.001 mg L⁻¹ de piridoxina-HCl, 0.001 mg L⁻¹ de tiamina-HCl, 0.002 mg L⁻¹ de glicina, 30 g L⁻¹ de sacarosa y 4.4 g L⁻¹ de phytigel con un pH ajustado de 5.5. El medio de cultivo previamente esterilizado a 121 °C a 15 atmosferas de

presión por 15 min. Se establecieron 6 explantes por caja magenta y 30 ml de medio por caja, concluida la transferencia las unidades experimentales fueron incubadas por cuatro semanas en las mismas condiciones de cultivo que la etapa anterior y distribuidas al azar.

3.4 Multiplicación in vitro de brotes de los genotipos

La multiplicación de brotes consistió en utilizar explantes axénicos obtenidos in vitro provenientes de la etapa anterior, se utilizaron brotes completos de los genotipos de una longitud de 1.0 a 1.5 cm, estos fueron colocados en las sales básicas del medio (MS). Más la suplementación de (BAP) 3.0 mg L^{-1} , ácido Naftalan-acético (NAA) 1.0 mg L^{-1} , fosfato diácido de sodio (NaH_2PO_4) 170 mg L^{-1} , 0.1 mg L^{-1} Tiamina, 0.1 mg L^{-1} Piridoxina, 0.5 mg L^{-1} Ácido nicotínico, Sacarosa 30 g L^{-1} y Phytigel 4.4 gr L^{-1} ajustando el pH a 5.5, previamente esterilizado. Se establecieron 10 repeticiones por genotipo colocando 6 brotes de forma horizontal, con la finalidad de que todo el brote estuviera en contacto con el medio de cultivo, debido a que en otras variedades del género opuntia que hemos trabajado se tiene una mayor respuesta cuando los brotes se colocan horizontalmente. Finalizada la siembra las cajas magenta fueron establecidas bajo condiciones controladas de fotoperiodo y temperatura igual que las etapas anteriores, bajo un diseño completamente al azar. En estas condiciones permanecieron durante 12 semanas, pero a las cinco semanas se transfirieron al mismo medio de cultivo para evaluar. La variable para evaluar fue el número de brotes por genotipo.

3.5 Enraizamiento de brotes regenerados in vitro de los genotipos

Los brotes lograron enraizar simultáneamente en la etapa de multiplicación de brotes, por lo que no fue necesario pasarlos a un medio con otro balance hormonal, pero si se transfirieron en un medio nuevo con las mismas características del medio utilizado en la etapa de multiplicación de brotes, en estas condiciones permanecieron por cinco semanas con la finalidad de que las raíces crecieran más y poder contabilizarlas. Se establecieron 10 repeticiones por variedad colocando 6 brotes por caja magenta, concluida la transferencia las unidades experimentales fueron incubadas en las mismas condiciones de cultivo que la etapa anterior.

IV. Resultados y Discusiones

4.1 Establecimiento aséptico de los explantes

Después de 15 días del establecimiento se evaluó la variable de asepsia, en ambas variables y se dedujo que el tratamiento de desinfestación utilizado fue el adecuado obteniendo un 90 % de explantes asépticos y con un 10 % de explantes oscurecidos por lo tanto la viabilidad de los explantes se mantuvo en un 90 %. Estos resultados los podemos avalar con lo mencionado por (Roca y Mroginski, 1991), quienes mencionan que el NaClO en concentraciones de 1 % a 3 % es un agente muy útil como germicida, por lo que, por mucho tiempo ha sido utilizado como esterilizante superficial en los tejidos vegetales. Por su parte

Murulanda *et al.*, 2010, reportan que la principal tarea de limpieza del material vegetal está limitada a la esterilización superficial de los explantes. Sin embargo, Olmos *et al.*, 2010, mencionan que en muchos casos se presenta contaminación después de la desinfestación debido a la presencia de patógenos endógenos los cuales pueden ser controlados con la aplicación de bacteriostáticos o antibióticos en el material vegetal o en el medio de cultivo.

4.2 Inducción de brotes

El fenómeno de la oxidación fenólica y la sobrevivencia en esta ocasión fue favorable, aunque en ocasiones, esto es un problema muy frecuente en el cultivo de tejidos vegetales de diferentes especies de plantas; por lo que, existen diferencia en los porcentajes de oxidación y sobrevivencia en las diferentes especies de nopal Estrada (1988). Estas variables se evaluaron a las seis semanas de permanecer en estas condiciones de cultivo.

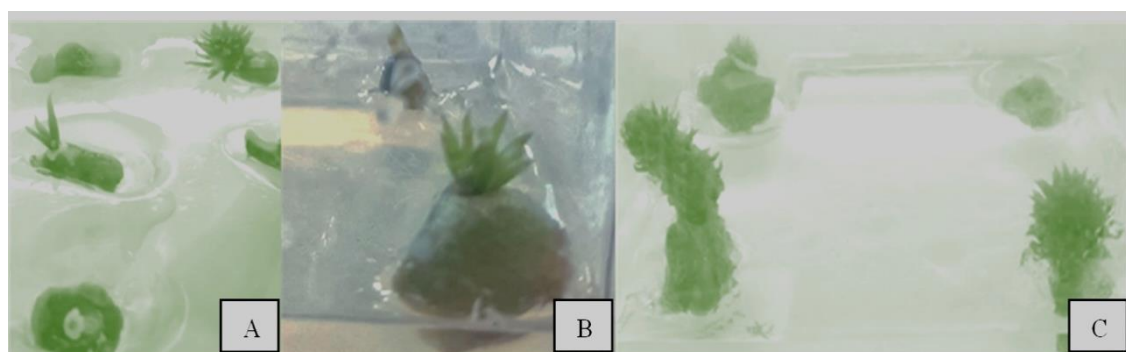


Figura 3. Respuesta los cultivares después de seis semanas del establecimiento in vitro en el medio de cultivo. A y B) Crecimiento a las 3 semanas, C) Crecimiento a las 6 semanas.

4.3 Multiplicación in vitro de brotes de los genotipos

Para la etapa de multiplicación de brotes. Generalmente el medio de cultivo suele ser uno de los aspectos más importante en los protocolos de la micropropagación en el género opuntia. El análisis de varianza no mostró diferencia significativa en los genotipos. Por lo que, se procedió a evaluar los resultados a través de estadística no paramétrica se sacaron las medias de los genotipos (Jalpa 12.20, Liso forrajero 10.10, más un testigo 2.30 brotes). Después de permanecer los explantes *in vitro* por 12 semanas en el medio de cultivo con los reguladores de crecimiento, se observó la respuesta, la cual se puede atribuir a la utilización y combinación de auxinas y citocininas que estimulan el crecimiento, elongación y multiplicación celular en cactáceas. Esta respuesta se puede justificar por lo mencionado por (Giusti *et al.*, 2002) quienes mencionan que el número más alto de brotes se obtuvo cuando se utilizaban citocininas en el medio de cultivo y han demostrado que las citocininas juegan un papel muy importante en la formación de brotes en cactáceas. Así mismo, Ghaffari *et al.*, (2013), mencionan que las tasas más altas de multiplicación de *Opuntia ficus-indica* son dadas en medios que contienen BAP (5 mg L^{-1}) y AIA (0.5 mg L^{-1}). Por lo que, nuestros resultados son similares a lo reportado por El-Finti, (2011) quién

obtuvo 13.5 brotes por explante con una combinación de 2.0 mg L⁻¹ de BA y 0.5 mg L⁻¹ de ANA, en la variedad Villanueva y muy contrastantes a lo reportado por Zuñiga (2012) quien reporta 24.5 brotes por explante con una concentración de 0.4 mg L⁻¹ de BA y un máximo de 53.75 brotes por explante con una concentración de 2.2 mg L⁻¹ de BA en la misma variedad. Por otro lado, García *et al.*, (2005), evaluaron una variedad de *Opuntia*, Milpa Alta, con una concentración de 0.1 mg L⁻¹ de BA y obtuvieron 4.2 brotes por explante.

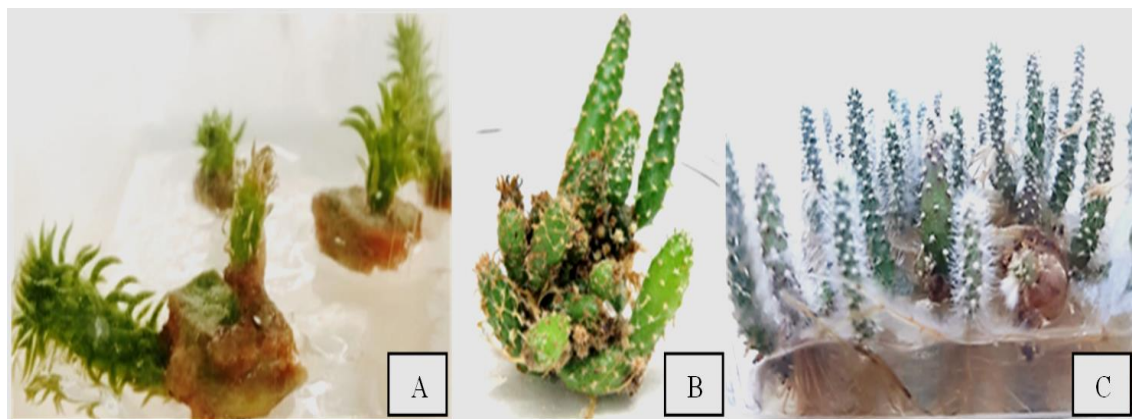


Figura 4. Respuesta de los cultivares después de 12 semanas en el medio de cultivo. A) Crecimiento a las 4 semanas, B) Número de brotes a las 8 semanas, C) Crecimiento de brotes a las 12 semanas.

4.4 Enraizamiento de brotes regenerados in vitro de ambas variedades.

El enraizamiento de brotes se logró, simultáneamente en la etapa anterior, por lo que no fue necesario pasarlos a un medio nuevo, esta respuesta resulta ser favorable en el desarrollo de protocolos de esta familia de cactáceas ya que nos permite optimizar pasos en los procesos de micropropagar especies de este género. Por lo que, esta respuesta pudo estar influenciada por la combinación de auxinas y citocininas de la etapa anterior que pudieron encontrarse residuos de estas hormonas, considerando que el BAP cuando se utiliza de manera individual promueve la formación de raíces tanto primarias como secundarias. En esta ocasión todos los brotes presentaron raíces en los dos genotipos. Por su parte, (Heyl y Schmölling, 2003; Jordan y Casaretto, 2006), mencionan que las citocininas desempeñan un papel importante en muchos de los procesos fisiológicos de las plantas, como la división celular, el desarrollo de cloroplastos, senescencia de hojas y control sobre el crecimiento de brotes. Su síntesis acontece principalmente en las raíces, pero también ocurre en meristemos apicales.



Figura 5. Respuesta de raíces en todos los brotes de los dos genotipos, después de 12 semanas de permanecer en los medios de cultivo.

4.5 Conclusiones

- La técnica de desinfección utilizada fue la adecuada para el establecimiento aséptico de los explantes en ambas variables.
- La oxidación no fue un factor limitante para la supervivencia de los explantes.
- El medio de cultivo y el balance hormonal de los reguladores de crecimiento permitieron la regeneración de brotes in vitro y la inducción de raíces en todos los explantes.
- El protocolo desarrollado en este estudio proporciona una alternativa para lograr la propagación masiva de los genotipos cultivados in vitro a partir de la activación de areolas como fuente de explante.

V. Literatura citada

- Bensadón, S., Hervet, D., Sáyago, S. G. y Goñi I. 2010. By-Products of *Opuntia ficus-indica* as a Source of Antioxidant Dietary Fiber. *Plant Foods Human Nutrition* 65: 210-216.
- Clayton, P. W, Hubstenberger J. F., Phillips G. C. y ButlerNance S. A. 1990. Micropropagation of members of the Cactaceae subtribe Cactinae. *J Amer Soc Hort Sci* 115(2): 337-343.
- Echenique, V., Rubinstein C. y Mroginski L. 2004. Biotecnología y Mejoramiento Vegetal. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. 254 p.
- El-Finti, A., El-Boullani R., El-Ayadi, F., Aabd, N. A. y El-Mousadik, A. 2011. Micropropagation in vitro of *Opuntia ficus-indica* in south of Morocco. *International Journal of Chemical and Biochemical Science* 1: 6–10.
- Escobar, H. A , Villalobos V. M, Villegas A.1986. *Opuntia* micropropagation by axillary proliferation. *Plant Cell Tissue Organ Culture* 7: 269-277.
- Estrada-Luna, A. A. y. Martínez-Hernández J. de J. 1988. Efecto de la salinidad en el crecimiento y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp). N. Calderón-Paniagua1; 3. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 7(2): 127-132.

- Felker, P., Paterson, A. y Jenderek, M. M. 2006. Forage Potential of *Opuntia* Clone Maintained by the USDA, National Plant Germplasm System (NPGS) Collection. *Crop Sci*, 46:2161–2168
- García-Saucedo, P. A., Valdez-Morales, M., Valverde, M. E., Cruz- Hernández, A. y Paredes-López, O. 2005. Plant regeneration of three *Opuntia* genotypes used as human food. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 80(2): 215-219.
- Ghaffari, A., Hasanloo, T. and Nekouei, M. K. 2013. Micropropagation of tuna (*Opuntia ficus-indica*) and effect of medium composition on proliferation and rooting. *International Journal of Biosciences*, 3(11): 129-139.
- Giusti, P., D. Vitti, F. Fiocchetti, F. Saccardo and M. Tucci. 2002. *In vitro* Propagation of three endangered cactus species. *Scientia Horticulture*. 95(4):319-332.
- Goossens, A., Häkkinen, S. T., Laakso, I., Seppänen, T., Biondi, S., De Sutter, V. y Oksman, K. M. 2003. A functional genomics approach toward the understanding of secondary metabolism in plant cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14): 8595- 8600.
- Guevara-Figueroa, T., Jiménez, I. H., Reyes, E. M., Mortensen, A. G., Laursen, B. B., Lin, L. W., De León, A., Fomsgaard, I. S. y Barba de la Rosa, A. 2010. Proximate composition, phenolic acid, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(6): 525-532.
- Heyl, A. y Schmülling, T. 2003. Cytokinin signal perception and transduction. *Current Opinion in Plant Biology*, 6(5): 480-488.
- Hubstenberger, J. F., Clayton P. W. y Phillips G.C. 1992. Micropropagation of cacti (Cactaceae). En Bajaj Y.P.S. Ed. *Biotechnology in Agriculture and Forestry*, Vol. 20. High-Tech and Micropropagation IV. pp. 49-68, Springer-Verlag, Berlín y Heidelberg.
- Jeon, Y. E., Yin, X. F., Choi, D. y Kang, I. J. 2011. Inhibitory activity of aromadendrin from prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) root on aldose reductase and the Formation of advanced glycation end products. *Food Science Biotechnology*, 20(5): 1283-1288.
- Johnson, J. L. y Emino E. R. 1979. Tissue culture propagation in the cactaceae. *Cactus and succulent* Lour, 51: 275-277.
- Jordán, M. y Casaretto J. 2006. Hormonas y Reguladores del crecimiento: auxinas, giberelinas y citocininas. *Ediciones Universidad de La Serena. Chile. Cap, 15*.
- Juárez, M. C. y Passera C. B. 2002. Propagación *in vitro* de *Opuntia ellisiana* Griff. y aclimatación a las condiciones del campo. *Biocell*, 26 (3), 319-324.
- Le Houerou, H. N. 1992. The role of salt bushes (*Atriplex* spp.) in arid land rehabilitation in the Mediterranean Basin. *A review Agroforestry System*, 18: 107-148.
- Malda, G., Suza'n, H. y Backhaus, R. 1999. *In vitro* culture as a potential method for the conservation of endangered plants possessing crassulacean acid metabolism. *Sci.Hortic. Amsterdam*, 81: 71–87.
- Marulanda, M., López A., Uribe M. y Gutiérrez L. 2010. “Biodiversidad y Biotecnología de la *Guadua angustifolia* Kunth.” Risaralda: Universidad Tecnológica de Pereira. pp. 106.
- Murashige, T., y F. Skoog. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue culture. *Physiol. Plant*. 15:473-479.
- Olmos, S., Luciani G. y Galdeano E. 2010. Micropropagación. In: *Biotecnología y mejoramiento vegetal II*. G Levitus, V Echenique, C Rubinstein, E Hopp, L Mroginski (eds). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. pp: 353-362.

- Roca, W. M. y Mroginski L. A. 1991. Establecimiento de cultivo de tejidos *in Vitro* en: W.M. Roca y L.A. Mroginski (Ed). Cultivo de tejidos en la agricultura. CIAT. Colombia 12-13 pp.
- Sánchez, E. y Hernández M.M. 2002. Propagation of Mexicana cacti threatened with extinction. *Cactus and Succulent Journal*. 74 (1): 17-21.
- Santos-Zea, L., Gutiérrez U. J. y Serna, S. 2011. Comparative analyses of total phenols, antioxidant activity, and flavonol glycoside profile of cCladode flours from different varieties of *Opuntia spp.* *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 7054-7061.
- Seguel, B. I. 2001. Conservación de recursos fitogenéticos *ex situ*. En: Estrategia en recursos fitogenéticos para los países del Cono Sur. PROCISUR. Barrieta y Rivas (Eds). Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Chile. pp. 79-90.
- Zúñiga. R. C. 2012. Micropropagación de varios cultivares de *Opuntia ficus- indica* (L.) Miller (Cactaceae). *Biblioteca de la Universidad de Guadalajara*. 36 pp.

10. EL CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES Y SU POSIBLE APLICACIÓN PARA PRODUCIR COMPONENTES DE INTERÉS EN NOPAL

¹Silos Espino H., ¹Escalera García R., Mocada González D., Ortiz Morales M., Valera Montero L. L., Flores Benítez S., Guzmán Maldonado H. S., ⁴Rodríguez Cabrera B., Escalante García N. y ⁴Olvera González E.

¹TecNM-Campus El Llano. Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales. Km 18 Aguascalientes-San Luis Potosí, El Llano Ags., México. C.P. 20330.

² Centro de Investigaciones en Óptica A.C. Prol. Constitución 607, Fracc. Reserva Loma Bonita, Aguascalientes, Aguascalientes, México. C. P. 20200.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), con sede en el Campo Experimental Bajío (CEBAJ), Celaya, Guanajuato 36040, Mexico; shoraciogm@gmail.com

⁴Laboratorio de Iluminación Artificial (LIA), Tecnológico Nacional de México Campus Pabellón de Arteaga, Carretera a la Estación de Rincón Km. 1, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes 20670, México

Correspondencia: OGE, ORCID: 0000-0002-2722-7809, hsilos@llano.tecnm.mx

Tema	Página
I. Resumen.	159
II. Introducción.	160
III. Materiales y métodos.	160
3.1 Medios de cultivo para conocer el efecto de los reguladores del crecimiento y luz.	160
3.2 Determinación de fenoles y flavonoides totales.	159
IV. Resultados y discusión .	161
4.1 Efecto de los componentes del medio de cultivo y condición de iluminación .	161
4.2 Contenido de fenoles y flavonoides .	162
V. Literatura citada.	162

I. Resumen

En este trabajo se probaron diferentes componentes del medio de cultivo y condiciones luz con la finalidad de inducir callo y la posible síntesis de algún componente de interés terapéutico. La combinación de Fructosa (2 g/l) con Jugo de tuna (2 ml/l). Manitol (4 g/l), AgNO₃ (1 mg/l), 2,4-D (2 mg/l) y AIA (1 g/l) induce exclusivamente callo y embriogénesis (Figura 1g1-2) en luz blanca y roja tipo LEDs y rayo láser, Éstos explantes sobresalieron en contenido de fenoles simples gálico (2283.30 ± 6.29), cumárico (2155.0 ± 35.0), ferúlico (2176 ± 27.9) para el genotipo Tapón aguanoso y clorogénico (380.22 ± 22.05) para Copena V1, expresados en (mg/100 g), lo cual puede ser una alternativa para sintetizar componentes de interés terapéutico en condiciones controladas.

II. Introducción

Ramírez-Ramos *et al.*, (2015) analizaron el comportamiento de componentes de valor nutricional-terapéutico durante el proceso de maduración del fruto de genotipos pigmentados de nopal (*Opuntia* sp.) con la finalidad de encontrar una opción de comercialización e industrialización. Desafortunadamente, los procesos de cultivo, cosecha y procesamiento industrial pueden representar altos costos para obtener componentes de alto valor terapéutico a partir del nopal. Una alternativa sería utilizar la técnica de cultivo de tejidos vegetales para dirigir la síntesis de algún componente específico, para lo cual se precisa de conocer los efectos del medio de cultivo, de los inductores (reguladores de crecimientos), condiciones físicas (luz, temperatura) y/o otros agentes no reportados aún. En la micropropagación del género *Opuntia* se ha utilizado comúnmente el medio Murashige y Skoog (1962) y se ha demostrado que la adición de BA (0.5 μ M) induce brotación e IBA enraizamiento (García-Saucedo *et al.*, 2005) en genotipos Naranjona, Cristalina y Reyna. La combinación de 4-amino 3,5,6-trichloropicolinic ácido (picloram) en 4 mg l⁻¹ induce la embriogénesis somática, aunque depende de la edad del explante, condición de luz, corte y la concentración de sacarosa (Gomes *et al.*, 2006) en el genotipo *O. ficus indica*. En relación a tipo de iluminación, se ha demostrado (Miller *et al.*, 2018) que la luz roja beneficia de manera general en la propagación de especies ornamentales (*Chrysanthemum* sp., *Gerbera jamesonii*, *Ficus benjamina* y *Lamprocapnos spectabilis*) pero es dependiente de la especie. Lofti *et al.*, (2019) encontraron que la luz roja LEDs induce mayor tamaño en brotes, la luz azul incrementa el peso del callo, la luz rojo lejano incrementa el número de brotes y con la adición de ácido cinámico combinado con luz roja se incrementa el enraizamiento en el género *Pyrus communis*. Así, la fuente de iluminación en los sistemas de propagación de plantas son un factor fundamental para controlar morfogénesis y metabolismo (Bello-bello *et al.*, 2017). Por todo lo anterior, en este trabajo se analizó el efecto de diversos componentes del medio de cultivo y condiciones de iluminación sobre la morfología y componentes de fenoles simples-flavonoides.

III. Materiales y métodos

En este trabajo se realizó en dos etapas y por lo tanto se utilizaron diferentes genotipos (genotipos de *Opuntia* con frutos de diferentes pigmentos y condiciones (diversos componentes del medio e implementación de iluminación tipo LEDs y Lasser) .

3.1 Medios de cultivo para conocer el efecto de los reguladores de crecimiento y luz

Se utilizaron explantes cultivados *in vitro* de dos especies que producen frutos rojos (Rojo pelón, Chicle, Tapón aguanoso, Copena V1, Cardona y Cacalote) en el medio básico Murashige y Skoog (MS, 1962) complementado con diferentes concentraciones y combinaciones de reguladores de crecimiento (2,4-D, Kinetina, BAP y AIA), así como la adición de compuestos (fuentes de carbohidratos, antioxidantes) e inductores de respuesta como la luz (Cuadro 1), con la finalidad de formar callo o sintetizar algún componente de interés terapéutico. Se utilizó agar 7 g/l, pH 5.7, se esterilizó a 121 °C por 15 min (15 libras) y los experimentos se colocaron en fotoperiodo 16/8 horas luz, a excepción cuando se aplicó pulso de luz tipo LEDs (blanca, verde, azul o roja) , en sesiones de 30 segundos por 30-60 días (la máxima intensidad fue de 150, 90, 55 y 150 μ mol m/s con un sistema de iluminación con 480 y 600 nm de longitud de onda ubicados a 60 cm laser (AZ libre, 10 mili watts y una longitud de onda de 632.8 nm) dirigida a tejido específico (20 s) en una sola ocasión a través del frasco.

3.2 Determinación de fenoles y flavonoides totales

Se determinó en material vegetal (callo del genotipo de Tapón aguanosa y planta completa de Copena V1) generados en el experimento conteniendo Dextrosa (10 g/l), jugo de tuna (7.5 ml/l) y miel de maguey (7.5 ml/l). Se utilizó la metodología de folin ciocalteu (Singlenton *et al.*, 1999).

Cuadro 1. Componentes del medio de cultivo y condiciones para inducir respuesta morfológica en explantes de nopal de fruto rojo.

Medio de cultivo	Fuente de carbono	Regulador de crecimiento	Iluminación
MS 50 % con carbón activado (1 g/l)	Dextrosa (10 g/l). Jugo de tuna (7.5 ml/l). y miel de maguey (7.5 ml/l).	Picloram (1 y 2 mg/l). 2,4-D (0.7 mg/l).	Luz blanca.y luz roja.

Todos los experimentos realizados se establecieron bajo un diseño experimental el cual fue completamente al azar. Cada tratamiento consistió como mínimo 10 repeticiones (frascos con 1-2 explantes). A cada una de las variables se les determinó el promedio y la desviación estándar respectiva. La toma de datos se realizó cuando las plantas alcanzaron los treinta y/o sesenta días de cultivo (dependía de la evidencia para cada experimento).

IV. Resultados y discusión

4.1 Efecto de los componentes del medio de cultivo y condición de iluminación

Como efecto del medio, al utilizar dextrosa, jugo de tuna y miel de maguey, Picloram y 2,4-D se produjo callo en algunos explantes y éstos mostraron pigmentación (Figura 1). De acuerdo a los anteriores, los explantes que adquieren la síntesis de pigmentos coinciden cuando el medio de cultivo contiene jugo de tuna, 2,4-D y con incidencia de luz roja o tipo láser, se induce también la embriogénesis. Existen reportes que indican que el género *Opuntia*, una vez establecida *in vitro*, se pueden generar brotes y raíces García-Saucedo *et al.*, (2005). Para generar callos y embriones, la especie representa limitantes, aunque Gomes *et al.*, (2006) inducen embriogénesis somática utilizando con el regulador de crecimiento con picloram (4.0 mg/l) y sacarosa en la especie *O. ficus indica*. En nuestro estudio, pudimos observar formación de plantas completas (generadas por embriogénesis) inducidas preferentemente con luz láser como se indica en la Figura 1h₁₋₂₋₃ para el genotipo Tapón aguanoso y Copena V1.

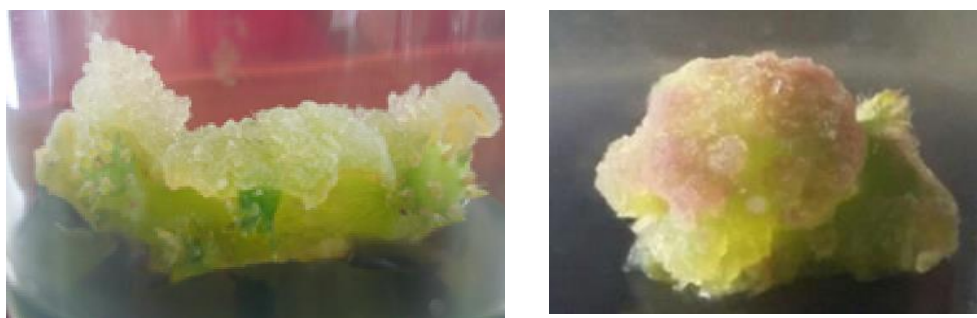


Figura 1. Evidencias del efecto de componentes del medio de cultivo y exposiciones a tipos de luz sobre explantes de dos genotipos de nopal (Tapón aguanosos y Copena V-1).

4.2 Contenido de fenoles y flavonoides

Fue sobresaliente el alto contenido (Cuadro 2) de fenoles simples en los explantes propagados *in vitro*, inclusive superiores a los reportados en frutos reconocidos por su aplicación terapéutica (Muñoz-Jáuregui *et al.*, 2007) como el Noni (*Morinda citrifolia*) y camu-camu (*Myrciaria dubia*). También, Chávez-Santoscoy *et al.*, (2009) encontraron en jugos de nueve genotipos de *Opuntia* de diferente pigmentación un total de fenólicos de 226.3 ± 26.4 microgramos de ácido gálico eq/g en Duraznillo (fruto rojo) y contenido de flavonoides de $338.1 (\pm 21.5)$ microgramos de quercetina eq/g para el genotipo Tapón (*O. robusta*) de fruto púrpura. Por otro lado, Ramírez-Ramos *et al.*, (2015) reportaron una concentración de compuestos fenólicos en el genotipo Alteña blanca con 165.5 mg EAG/100 g contenido de flavonoides de 11.21 mg EC/100 g en Tapón (*O. robusta*) de fruto púrpura. Lo encontrado en callos y plantas cultivadas *in vitro*, representa una opción viable de síntesis de fenoles bajo condiciones controladas.

Cuadro 3. Contenido de fenoles y flavonoides en explantes de nopal bajo condiciones *in vitro*.

Genotipo	Ácidos fenólicos simples en nopal (mg/100 g)				Fenólicos totales (mg) EAG/100 g	Flavonoides (mg) EC/100 g
	Ácido gálico	Acido cumárico	Ácido ferúlico	Clorogénico		
Tapón	1887.2 ± 1.7	1121.0 ± 49.5	863.32 ± 111.8	380.22 ± 22.05	391.39 ± 2.1	67.06 ± 0.015
Copena V1	2283.3 ± 6.2	2155.0 ± 35.0	2176 ± 27.9	314.14 ± 26.47	374 ± 5.9	68.5 ± 0.03

V. Literatura citada

- Emitting-Diodes: progress in plant micropropagation. In Chlorophyll edited by E. Jacob-Lopes, L. Queiroz Zepka, M. I. Queiroz. IntechOpen. 93-101 pp.
- Felker, P., Stinzling, Leitenberger M., Carle R., Vogt T. y Bruch R. (2008). Colour inheritance in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruits. Ann Appl Biol 152 (2008) 307-308.
- García-Saucedo, P. A., Valdez-Morales M., Valverde M. E., Cruz-Hernández A. y Paredes-López O, 2005. Plant regeneration of three *Opuntia* genotypes used as human food. Plant Cell, Tissue and Organ Culture volume 80: 215–219.
- Gomes FLAF, Heredia FF, Silva PBE, Faco O, Campos FDADP. 2006. Somatic embryogenesis and plant regeneration in *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae). Scientia Horticulturae 108: 15-21.
- Lotfi, L., Mars M. y Werbrouck S. 2019. Optimizing pear micropropagation and rooting with light emitting diodes and trans-cinnamic acid. Plant Growth Regulation.88:173–180.
- Miler, M., Kulus D., Woźny A., Rymarz D., Hajzer M. Wierzbowski K., Nelke R. y Szeffs L. 2018. Application of wide-spectrum light-emitting diodes in micropropagation of popular ornamental plant species: a study on plant quality and cost reduction. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant 55:99–108,.
- Muñoz Jáuregui, A. M., Ramos-Escudero D. F., Alvarado-Ortiz Ureta C. y Castañeda Castañeda B. 2007. Evaluación de la capacidad antioxidante y

- contenido de compuestos fenólicos en recursos vegetales promisorios Rev. Soc. Quím. del Perú. 73(3): 142-149.
- Murashige T, Skoog F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. Physiologic Plantarum. 15:437-497.
- Ramírez-Ramos, M., Rosario García-Mateos M. del R., Corrales-García J., Ybarra-Moncada C. Castillo-González A. M. 2015. Compuestos antioxidantes en variedades pigmentadas de tuna (*Opuntia* sp.). Rev. Fitotec. Mex. Vol. 38 (4) 349 – 357.
- Singleton V.L., Orthofer R. y Lamuela-Raventos R.M. 1999. Analysis of total phenols y other oxidation substrates and antioxidants by means of the Folin-Ciocalteau reagent. Meth. Enzymol. 299:152-178 p.

Sección: Métodos de extracción y función de los componentes de nopal.



11. MÉTODOS EXTRACTIVOS DE METABOLITOS DEL NOPAL: AVANCES Y APLICACIONES

¹Flores Martínez H. y ¹León Campos C.

¹TecNM/Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Laboratorio de Alimentos y Productos Naturales. km 10 Carr. a San Miguel Coyutlán, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco 45640. México.

Correspondencia: FMH, ORCID: 0000-0001-7214-9785, hector.fm@tlajomulco.tecnm.mx

Tema	Página
I. Resumen.	166
II. Introducción.	166
2.1 El consumo de fibra ayuda a regular la glucosa en sangre por varias razones.	167
III. Métodos de extracción convencionales en el estudio de nopal.	168
3.1 Extracción por maceración de metabolitos del nopal: fundamentos y aplicaciones.	168
3.2 Soxhiet: un enfoque tradicional en la extracción de metabolitos del nopal.	170
IV. Técnicas modernas de extracción aplicadas al nopal	172
4.1 Extracción asistida por ultrasonido.	172
4.2 Extracción asistida por microondas.	174
4.3 Extracción por fluidos supercríticos.	176
V. Análisis de metabolitos.	178
5.1 Cromatografía de alta resolución (HPLC) en la identificación de compuestos del nopal.	178
5.2 Espectroscopia de masas: aplicaciones en la caracterización de metabolitos del nopal.	180
VI. Conclusión y recomendaciones.	182
6.1 Descubrimiento clave en el estudio del nopal.	182
6.2 Potencial del nopal en el desarrollo de productos innovadores.	183
VII. Literatura citada.	185

I. Resumen

El nopal, una planta perteneciente al género *Opuntia*, ha sido objeto de interés en la investigación académica debido a su potencial como fuente de metabolitos con propiedades beneficiosas para la salud humana. Esta planta, también conocida como la "tuna" o "chumbera", es característica de regiones áridas y semidesérticas y ha sido consumida tradicionalmente en diversas culturas por sus propiedades nutricionales y medicinales. La contextualización del nopal como fuente de metabolitos primarios y secundarios se ha convertido en un tema crucial en la investigación científica, destacando su importancia en la búsqueda de compuestos bioactivos con aplicaciones terapéuticas.

II. Introducción

La importancia nutricional de los metabolitos presentes en el nopal (*Opuntia spp.*) ha sido objeto de un creciente interés en la investigación científica, destacando su potencial contribución a la salud humana. La abundancia y diversidad de compuestos bioactivos en el nopal han sido examinadas por varios estudios, proporcionando un marco para entender cómo estos metabolitos pueden desempeñar un papel crucial en la nutrición y bienestar humano.

De manera general, el nopal ha sido estudiado como una innegable fuente de fibra dietética soluble e insoluble con importantes beneficios para la salud. La fibra dietética en el nopal, según Pérez-Ramírez y colaboradores (2021), puede mejorar la regularidad intestinal y ayudar en la prevención de trastornos digestivos. La revisión de Pérez-Ramírez y colaboradores (2021) destaca, asimismo, que la fibra dietética en el nopal desempeña un papel crucial en la promoción de la salud gastrointestinal y adicionalmente reporta un efecto benéfico en la regulación del nivel de colesterol en sangre, principalmente del llamado colesterol LDL, contribuyendo así a la prevención de enfermedades cardiovasculares.

El estudio de Ramírez-Moreno *et al.*, (2019) sugieren que la fibra del nopal podría tener beneficios en la regulación de la glucosa en sangre, indicando su relevancia nutricional en el manejo de condiciones metabólicas como la diabetes. Estos hallazgos enfatizan cómo los metabolitos específicos del nopal pueden tener impactos significativos en la salud, especialmente en el contexto de la nutrición y la prevención de enfermedades crónicas.

2.1 El consumo de fibra ayuda a regular la glucosa en sangre por varias razones

- 1) Retraso en la absorción de glucosa: La fibra, especialmente la fibra soluble, forma un gel en el tracto gastrointestinal que ralentiza la digestión y la absorción de los nutrientes, incluida la glucosa. Esto ayuda a evitar picos de glucosa en sangre después de las comidas al mantener una liberación más gradual de glucosa en el torrente sanguíneo.
- 2) Mejora de la sensibilidad a la insulina: La fibra también puede mejorar la sensibilidad a la insulina, lo que significa que las células responden de manera más eficiente a la insulina para transportar la glucosa desde la sangre hacia las células. Una mayor sensibilidad a la insulina ayuda a mantener niveles de glucosa en sangre más estables.
- 3) Regulación de la ingesta de alimentos: La fibra contribuye a una sensación de saciedad, lo que puede ayudar a controlar el peso y prevenir la obesidad, un factor

de riesgo para la diabetes tipo 2. Mantener un peso saludable es importante para regular los niveles de glucosa en sangre.

- 4) Modulación de la microbiota intestinal: La fibra también puede afectar positivamente a la microbiota intestinal. Algunas bacterias beneficiosas en el intestino pueden fermentar la fibra y producir compuestos que pueden tener efectos beneficiosos en la regulación de la glucosa y la salud metabólica en general.

Además, la relación entre el nopal y la microbiota intestinal ha sido explorada por Pérez-García *et al.*, (2021), quienes investigaron los efectos del consumo de nopal en un modelo murino de colitis. Sus resultados sugieren que el nopal puede tener impactos beneficiosos en la salud intestinal al modular la microbiota, proporcionando así otra perspectiva sobre la importancia nutricional del nopal en la salud digestiva. Estos resultados subrayan la complejidad de los efectos del nopal en el organismo y destacan la necesidad de una comprensión más profunda de los mecanismos de acción involucrados.

Por otra parte, el nopal ha sido objeto de estudio como fuente de diversos metabolitos secundarios. Rodríguez-García *et al.*, (2018) han resaltado la presencia de polifenoles en el nopal, incluyendo flavonoides y ácido clorogénico. Estos compuestos han sido asociados con propiedades antioxidantes, lo que sugiere su potencial para contrarrestar el estrés oxidativo en el cuerpo humano.

La diversidad de metabolitos en el nopal también se extiende a las betalaínas, pigmentos naturales que han sido identificados en estudios como los de Martínez-Romero *et al.*, (2020). Estos pigmentos naturales no solo confieren al nopal su color característico, sino que también han mostrado capacidad para neutralizar radicales libres, lo que contribuye a la protección celular contra el estrés oxidativo. Esta característica antioxidante de las betalaínas del nopal ha suscitado interés en la prevención de enfermedades relacionadas con el envejecimiento y el daño celular.

Además de contribuir al color característico del nopal, estas sustancias han demostrado tener propiedades anti-inflamatorias, lo que agrega otra dimensión a la importancia nutricional de esta planta. La capacidad de los polifenoles del nopal para modular la respuesta inflamatoria resalta su importancia en la promoción de la salud a través de la alimentación. En este contexto, González-Mendoza *et al.*, (2022) han examinado la capacidad del nopal para modular dicha respuesta inflamatoria. Sus hallazgos sugieren que ciertos compuestos presentes en el nopal pueden tener efectos antiinflamatorios significativos, lo que respalda la idea de que esta planta podría desempeñar un papel crucial en la gestión de enfermedades inflamatorias crónicas.

En particular, los polifenoles presentes en el nopal, según Rodríguez-García *et al.*, (2018), no solo poseen propiedades antiinflamatorias, sino también importantes actividades antioxidantes mediante la captación de radicales libres y sustancias reactivas al oxígeno ROS.

La importancia nutricional de los metabolitos presentes en el nopal se extiende más allá de su contribución a la salud gastrointestinal y metabólica, abarcando aspectos esenciales de la nutrición y el bienestar. La riqueza de compuestos bioactivos en el nopal ha sido identificada como una fuente potencial para abordar desafíos nutricionales y mejorar la calidad de la dieta.

A pesar de estos beneficios potenciales, la investigación sobre la importancia nutricional de los metabolitos en el nopal también enfrenta desafíos. La variabilidad en la composición química del nopal debido a factores como la especie, el entorno y las prácticas agrícolas ha sido señalada como un aspecto crítico por Salazar-García *et al.*, (2020). Esta variabilidad destaca la necesidad de investigaciones más detalladas y específicas para comprender completamente cómo estos metabolitos pueden influir en la nutrición humana.

Asimismo, la estandarización de métodos para evaluar la biodisponibilidad y la absorción de los metabolitos del nopal sigue siendo un área de desarrollo, como señalan García-Villanova *et al.*, (2019). La falta de métodos estandarizados dificulta la comparación de resultados entre estudios y limita la aplicación práctica de los hallazgos en la industria alimentaria y farmacéutica.

En conclusión, la importancia nutricional de los metabolitos en el nopal se manifiesta en su potencial para mejorar la salud gastrointestinal, regular el metabolismo y combatir el estrés oxidativo. La diversidad de compuestos, desde polifenoles hasta fibra dietética y betalainas, destaca el nopal como una fuente valiosa de nutrientes bioactivos. A pesar de los desafíos de la variabilidad química, la investigación continua en este campo ofrece perspectivas emocionantes para la promoción de la salud y la prevención de enfermedades crónicas.

La importancia nutricional de los metabolitos en el nopal se extiende a múltiples aspectos de la salud humana. Desde su contribución a la salud gastrointestinal y metabólica hasta su potencial en la modulación de la respuesta inflamatoria y la regulación del colesterol, el nopal emerge como una fuente valiosa de nutrientes bioactivos. A pesar de los desafíos en la investigación, la exploración continua de los metabolitos del nopal promete aportar conocimientos esenciales para el desarrollo de intervenciones nutricionales y terapéuticas.

Cabe mencionar que la investigación sobre la seguridad y toxicidad del consumo de nopal a largo plazo es esencial para respaldar su uso potencial como suplemento alimenticio o terapéutico. Si bien la mayoría de los estudios hasta la fecha han informado efectos positivos, es necesario abordar posibles efectos secundarios y evaluar la seguridad a largo plazo, como sugieren Méndez-Cuesta *et al.*, (2021).

Asimismo, otro aspecto que requiere atención es la estandarización de los métodos de extracción de metabolitos del nopal. La diversidad de compuestos presentes en la planta exige protocolos de extracción específicos para cada grupo de metabolitos. En este sentido, García-Villanova *et al.* (2019) han abogado por el desarrollo de métodos estandarizados que permitan una comparación más efectiva entre estudios y faciliten la aplicación práctica de los resultados en la industria alimentaria y farmacéutica.

III. Métodos de extracción convencionales en el estudio del nopal

3.1 Extracción por maceración de metabolitos del nopal: Fundamentos y Aplicaciones

La extracción por maceración ha surgido como una técnica eficaz y ampliamente utilizada para la obtención de metabolitos del nopal (*Opuntia spp.*), una planta rica en compuestos bioactivos con propiedades nutricionales y medicinales. Esta técnica, fundamentada en principios fisicoquímicos, ha sido objeto de estudio en la literatura científica, explorando sus fundamentos y diversas aplicaciones en la obtención de metabolitos específicos del

nopal, dada su facilidad de aplicación e innegable utilidad en su aplicación para la extracción de compuestos activos de alta labilidad.

La maceración, definida por Pérez-Sánchez *et al.*, (2016), es un proceso de extracción que implica la inmersión de material vegetal en un disolvente para permitir la transferencia de los componentes solubles hacia dicho disolvente. En el caso del nopal, esta técnica se ha aplicado para extraer una variedad de metabolitos, incluyendo polifenoles, flavonoides y betalainas, entre otros compuestos.

El proceso de maceración se basa en la difusión de los metabolitos desde las células vegetales hacia el disolvente, permitiendo la liberación de compuestos bioactivos presentes en diversas partes del nopal, como los cladodios y las frutas. Este método se destaca por su simplicidad y accesibilidad, ya que no requiere equipos especializados y puede ser llevado a cabo con disolventes comunes, como agua, etanol o mezclas de ambos, principalmente.

La temperatura, el tamaño de partícula y el tiempo de maceración son factores críticos que influyen en la eficiencia de la extracción. Estudios de Rodríguez-García *et al.*, (2018) han demostrado que la temperatura puede afectar significativamente la velocidad de extracción y la cantidad de metabolitos recuperados. Un equilibrio adecuado entre la temperatura y el tiempo de maceración es esencial para garantizar una extracción eficiente sin degradar los compuestos termosensibles.

Las aplicaciones de la extracción por maceración de metabolitos del nopal son diversas y abarcan campos como la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. En el ámbito alimentario, García-Villanova *et al.*, (2019) han utilizado la maceración para obtener extractos de nopal ricos en fibra y antioxidantes, que se incorporan en la formulación de alimentos funcionales. Estos extractos no solo enriquecen nutricionalmente los productos, sino que también aprovechan las propiedades saludables del nopal.

En la industria farmacéutica, la extracción por maceración se ha aplicado para obtener extractos concentrados de nopal destinados a la producción de suplementos nutricionales y medicamentos fitoterapéuticos. Martínez-Romero *et al.*, (2020) han explorado la obtención de extractos de nopal ricos en betalainas, destacando su potencial aplicación en el desarrollo de productos farmacéuticos con propiedades antioxidantes.

Además, en el ámbito cosmético, la extracción de metabolitos del nopal mediante maceración se ha considerado para la obtención de extractos utilizados en formulaciones de productos de cuidado de la piel. La presencia de polifenoles y otros compuestos bioactivos en estos extractos ha sido asociada con propiedades antiinflamatorias y antioxidantes, que pueden contribuir a la salud y el bienestar de la piel.

García-Villanova *et al.*, (2019) han explorado la extracción de fibra en el nopal mediante la maceración, resaltando la importancia de este proceso en la obtención de compuestos nutricionales clave. La fibra es un componente esencial para la salud digestiva y la reducción del riesgo de enfermedades crónicas, y la maceración se presenta como una técnica eficiente para preservar las propiedades beneficiosas de la fibra en los extractos de nopal.

En términos de aplicaciones específicas, la investigación de Martínez-Romero *et al.*, (2020) destaca el potencial terapéutico de las betalainas extraídas del nopal. Este estudio subraya cómo la extracción por maceración no solo es adecuada para la obtención de compuestos, sino que también proporciona un camino para la producción de extractos enriquecidos con betalainas, que podrían ser utilizados en el desarrollo de medicamentos antioxidantes.

Además, la optimización de las condiciones de extracción sigue siendo un área activa de investigación. La temperatura, el tiempo de maceración y la elección del disolvente son variables clave que influyen en la eficacia de la extracción. García-Villanova *et al.*, (2019) subrayan la importancia de estudios detallados para determinar las condiciones óptimas en función de los compuestos objetivo, proporcionando una guía valiosa para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

A pesar de sus numerosas aplicaciones, la extracción por maceración presenta desafíos, como la variabilidad en la composición química del nopal y la necesidad de optimizar las condiciones de extracción para maximizar la eficiencia. Sin embargo, los avances en la comprensión de los principios fundamentales de esta técnica y su adaptación a diferentes propósitos han contribuido significativamente a su utilidad en la obtención de metabolitos del nopal.

A pesar de estos avances, persisten desafíos significativos en la extracción por maceración de metabolitos del nopal. La variabilidad en la composición química de diferentes especies y variedades de nopal ha sido identificada como un factor crítico, como señalan Salazar-García *et al.*, (2020). Esta variabilidad requiere una consideración cuidadosa al diseñar protocolos de extracción y al interpretar resultados, y destaca la necesidad de un enfoque más específico según la variedad de nopal estudiada.

De manera general, la extracción por maceración se presenta como una técnica versátil y efectiva para obtener metabolitos del nopal, destacando su aplicabilidad en diversos campos. Los estudios fundamentales y aplicados han proporcionado información valiosa sobre los factores que afectan la eficiencia de la extracción y han ampliado las posibilidades de utilización de los extractos de nopal en distintas industrias con aplicaciones nutricionales, farmacéuticas y cosméticas. Los avances recientes en tecnologías emergentes y la comprensión más profunda de los fundamentos de la maceración ofrecen oportunidades emocionantes para mejorar la eficiencia y la selectividad de esta técnica. Sin embargo, los desafíos persistentes, como la variabilidad en la composición química y la optimización de las condiciones de extracción, requieren una atención continua para maximizar el potencial del nopal en diversas aplicaciones.

3.2 Soxhlet: Un enfoque tradicional en la extracción de metabolitos del nopal

El Soxhlet ha perdurado como un enfoque tradicional y eficiente en la extracción de metabolitos del nopal (*Opuntia* spp.), desempeñando un papel destacado en la investigación científica y en la obtención de compuestos bioactivos de esta planta. Esta técnica, que combina la extracción por solvente con el principio de destilación, ha sido objeto de estudio en la literatura científica, proporcionando una visión profunda de su aplicación, fundamentos y contribuciones a la investigación en el campo del nopal.

La técnica Soxhlet, descrita por primera vez en 1879 por Franz von Soxhlet, implica la extracción continua de un componente soluble de un sólido mediante la circulación de un solvente a través del material vegetal. Este proceso se realiza en un ciclo de evaporación y condensación, lo que permite una extracción más completa y eficiente en comparación con otros métodos. En el contexto del nopal, este enfoque ha sido utilizado para extraer diversos metabolitos, incluyendo polifenoles, flavonoides y compuestos volátiles.

El trabajo de Rodríguez-García *et al.*, (2018) destaca la eficacia del Soxhlet en la extracción de polifenoles del nopal. Este grupo de compuestos, conocido por sus propiedades antioxidantes, se encuentra en abundancia en el nopal y ha sido objeto de atención debido a sus posibles beneficios para la salud. La aplicación del Soxhlet en la extracción de

polifenoles ha demostrado ser particularmente útil para obtener extractos ricos en estos compuestos, allanando el camino para investigaciones más detalladas sobre sus propiedades y aplicaciones.

La versatilidad del Soxhlet también se extiende a la extracción de flavonoides del nopal, como se evidencia en estudios de Martínez-Romero *et al.*, (2020). Los flavonoides, que tienen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas, son componentes cruciales en la búsqueda de compuestos bioactivos en plantas medicinales como el nopal. La aplicación del Soxhlet ha permitido la obtención de extractos concentrados de flavonoides, contribuyendo así a la investigación sobre el potencial terapéutico de estas sustancias.

La adaptabilidad del Soxhlet se manifiesta también en la extracción de compuestos específicos, como los betalainas, que han sido estudiadas por Martínez-Romero *et al.*, (2020). Las betalainas, pigmentos responsables de los colores vibrantes en el nopal, han despertado interés debido a sus propiedades antioxidantes y potencial terapéutico. La aplicación del Soxhlet en la extracción de betalainas destaca su utilidad para obtener extractos concentrados de estos compuestos, proporcionando así material valioso para investigaciones más detalladas sobre sus propiedades bioactivas.

El Soxhlet no solo ha sido utilizado para la extracción de compuestos fenólicos, sino también para la obtención de aceites vegetales y compuestos volátiles del nopal.

En el ámbito específico de la extracción de compuestos volátiles, García-Rojas *et al.*, (2019) han profundizado en el uso del Soxhlet para obtener aceites esenciales del nopal. Estos aceites esenciales, ricos en terpenoides y compuestos aromáticos, no sólo son responsables del aroma característico del nopal, sino que también poseen propiedades antimicrobianas y antioxidantes. La aplicación del Soxhlet en la extracción de aceites esenciales destaca su versatilidad para capturar una amplia gama de compuestos volátiles, contribuyendo así al conocimiento de los perfiles aromáticos y potenciales aplicaciones en la industria.

Salazar-García *et al.*, (2020) han explorado la aplicación de Soxhlet en la extracción de aceites de frutas de *Opuntia* spp., subrayando su eficiencia en la obtención de compuestos lipídicos. Estos aceites, ricos en ácidos grasos esenciales y otros componentes, han atraído la atención en la industria alimentaria y cosmética debido a sus propiedades beneficiosas en la salud, principalmente en el sistema cardiovascular. La presencia de ácidos grasos esenciales, como el ácido linoleico, resalta la importancia de este enfoque en la identificación de componentes clave para la nutrición humana.

A pesar de su eficacia, el Soxhlet no está exento de limitaciones, y la elección del solvente es un aspecto crítico en el proceso de extracción. Investigaciones de Pérez-Sánchez *et al.*, (2016) han comparado métodos emergentes con el Soxhlet, señalando que en algunos casos, especialmente con solventes menos convencionales, los métodos alternativos pueden ofrecer ventajas en términos de velocidad y rendimiento. Estas comparaciones destacan la importancia de evaluar no solo la eficiencia sino también la sostenibilidad y la viabilidad económica de la técnica del Soxhlet en relación con los avances tecnológicos.

Asimismo, las condiciones de extracción deben ser cuidadosamente consideradas para optimizar la eficiencia y evitar la degradación de compuestos termosensibles. Además, la variabilidad en la composición química del nopal, como señalan Salazar-García *et al.*, (2020), plantea la necesidad de adaptar los protocolos de extracción a diferentes especies y variedades de nopal.

Así pues, el método Soxhlet, como enfoque tradicional en la extracción de metabolitos del nopal, ha demostrado ser una herramienta valiosa en la investigación científica. Su capacidad para extraer una variedad de compuestos, desde polifenoles hasta aceites esenciales y betalainas, resalta su versatilidad y aplicabilidad en diferentes áreas de estudio. Sin embargo, la investigación continúa, como la realizada por García-Rojas, Martínez-Romero y otros, es esencial para perfeccionar su aplicación, abordar desafíos y explorar nuevas dimensiones en la contribución del Soxhlet al entendimiento de las propiedades del nopal.

IV. Técnicas modernas de extracción aplicadas al nopal

4.1 Extracción asistida por ultrasonido

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) ha emergido como una técnica prometedora en el ámbito de la obtención de compuestos bioactivos de diversas materias primas, y su aplicación al nopal no es una excepción. El nopal, perteneciente al género *Opuntia*, es una planta ampliamente cultivada en regiones áridas y semiáridas, conocida por sus propiedades nutritivas y medicinales. La aplicación de la EAU a la extracción de compuestos del nopal ha sido objeto de interés para investigadores en busca de métodos eficientes y sostenibles. En este contexto, estudios recientes han explorado los beneficios y desafíos de esta técnica.

Uno de los estudios pioneros en esta área es el realizado por Rodríguez-Solís *et al.*, (2018), quienes investigaron la extracción de mucílagos del nopal utilizando ultrasonido. Los autores destacan la eficiencia de la EAU al mejorar significativamente la velocidad y rendimiento de la extracción en comparación con métodos convencionales. Además, señalan que la EAU preserva mejor las propiedades funcionales de los mucílagos, lo que los hace más atractivos para aplicaciones alimentarias y farmacéuticas.

Otro aspecto clave abordado por García-González *et al.*, (2020) es la optimización de los parámetros de la EAU para maximizar la extracción de compuestos bioactivos del nopal. Estos investigadores resaltan la importancia de ajustar la amplitud y la frecuencia de las ondas ultrasónicas, así como la duración del proceso, para obtener los mejores resultados. Además, señalan que la EAU puede contribuir a la obtención de extractos con perfiles antioxidantes y antiinflamatorios mejorados, lo que amplía las posibles aplicaciones de los productos obtenidos.

La investigación no solo se ha centrado en la obtención de compuestos bioactivos, sino también en la mejora de la eficiencia y sostenibilidad del proceso. En este sentido, el trabajo de Fernández *et al.*, (2019) destaca la capacidad de la EAU para reducir el consumo de solventes y el tiempo de extracción, lo que se traduce en una menor huella ambiental. Estos hallazgos son cruciales en un contexto en el que la sostenibilidad y la eficiencia son imperativos en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías.

Aunque la EAU ofrece beneficios sustanciales, algunos desafíos deben abordarse. Aguilar-Arteaga *et al.*, (2021) señalan la importancia de considerar la variabilidad en las características físicas y químicas del nopal, ya que esto puede afectar la eficacia de la EAU. La adaptabilidad de los parámetros de ultrasonido a diferentes variedades de nopal es esencial para garantizar la eficacia de los resultados.

A pesar de los avances notables en la aplicación de la Extracción Asistida por Ultrasonido (EAU) al nopal, persisten desafíos que requieren una atención cuidadosa para consolidar y

ampliar su aplicación. Un aspecto crucial destacado por Hernández-Hernández *et al.*, (2022) es la necesidad de evaluar la estabilidad de los compuestos extraídos durante el almacenamiento a largo plazo. La susceptibilidad de los productos obtenidos a la degradación o cambios en sus propiedades físicas y químicas podría afectar su viabilidad comercial y aplicabilidad en diferentes sectores.

La comprensión de los mecanismos subyacentes en la interacción entre las ondas ultrasónicas y los tejidos del nopal también es esencial para mejorar la eficiencia de la EAU. Un estudio significativo realizado por Gutiérrez-Cortez *et al.*, (2021) exploró los aspectos mecánicos y térmicos del proceso, contribuyendo a una comprensión más profunda de cómo las ondas ultrasónicas afectan la estructura celular del nopal. Este conocimiento es fundamental para optimizar los parámetros de la EAU y maximizar la extracción sin comprometer la calidad de los compuestos obtenidos.

Investigaciones realizadas por Pérez-Sánchez *et al.*, (2016) han examinado métodos emergentes para la extracción de betalainas, uno de los grupos de metabolitos más destacados del nopal. Su estudio comparativo entre métodos convencionales y emergentes, como la extracción asistida por ultrasonidos, destaca la eficacia y selectividad de estas nuevas aproximaciones. La aplicación de tecnologías emergentes abre la puerta a una extracción más eficiente, reduciendo tiempos y solventes utilizados, lo que podría tener implicaciones positivas tanto en la sostenibilidad como en la rentabilidad de la extracción de metabolitos del nopal.

Otro aspecto destacado en la investigación es la diversidad de compuestos presentes en el nopal y su potencial aplicación en diferentes industrias. El trabajo de Sánchez-González *et al.*, (2023) se centra en la identificación y cuantificación de compuestos específicos, como polifenoles y betalainas, que poseen propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Esta caracterización detallada es esencial para comprender mejor el valor nutricional y terapéutico de los productos obtenidos mediante EAU.

La transferencia de la investigación a la escala industrial también ha sido un área de interés. Martínez-Cruz *et al.*, (2020) discuten la viabilidad económica de la implementación de la EAU en la producción a gran escala de extractos de nopal. Evaluar los costos asociados con el equipo, la energía y los insumos es fundamental para determinar la viabilidad comercial y la competitividad de esta tecnología en comparación con los métodos convencionales de extracción.

En cuanto a futuras direcciones, la investigación debería dirigirse hacia la integración de la EAU con otras tecnologías emergentes para potenciar aún más sus beneficios. La combinación de la EAU con técnicas como la cavitación hidrodinámica o la extracción con fluidos supercríticos podría ofrecer sinergias que mejoren la eficiencia y selectividad de la extracción (Ortega-Ramírez *et al.*, 2022).

Además, es necesario profundizar en la aplicación de la EAU a otras variedades de nopal y explorar su potencial en la obtención de compuestos específicos con propiedades terapéuticas particulares. La diversidad genética en el género *Opuntia* podría albergar compuestos bioactivos únicos, lo que abre oportunidades para la investigación y desarrollo de productos especializados.

Así pues, la aplicación de la Extracción Asistida por Ultrasonido al nopal ha demostrado ser una estrategia valiosa para obtener compuestos bioactivos de manera eficiente y sostenible. La investigación revisada destaca la mejora en la velocidad y rendimiento de la extracción, así como la preservación de propiedades funcionales. Sin embargo, es crucial

abordar los desafíos asociados, como la variabilidad de las características del nopal, para garantizar la aplicabilidad generalizada de esta técnica en la industria alimentaria y farmacéutica.

A pesar de los avances significativos, la aplicación de la Extracción Asistida por Ultrasonido al nopal sigue evolucionando. La investigación continuada en la estabilidad de los compuestos extraídos, la comprensión de los mecanismos subyacentes, la caracterización detallada de los compuestos presentes y la evaluación de la viabilidad económica son áreas clave que deben abordarse para consolidar y ampliar el uso de esta técnica en diversas industrias.

4.2 Extracción asistida por Microondas

La Extracción Asistida por Microondas (EAM) se ha posicionado como una técnica eficiente y rápida en la obtención de compuestos bioactivos de diversas materias primas, y su aplicación al nopal ha ganado interés en la investigación científica. Este enfoque novedoso presenta ventajas significativas en términos de tiempo, eficiencia y sostenibilidad, lo que ha llevado a numerosos estudios centrados en explorar sus aplicaciones específicas en el contexto del nopal.

En el estudio de Martínez *et al.*, (2019), se investigó la aplicación de la EAM para la extracción de polisacáridos del nopal. Los resultados revelaron que la EAM proporciona una mayor eficiencia de extracción en comparación con métodos convencionales, destacando la capacidad de las microondas para generar calentamiento selectivo y homogéneo en el material vegetal. Este enfoque también se asoció con tiempos de procesamiento reducidos, lo que contribuye a la sostenibilidad del proceso y a la conservación de las propiedades bioactivas de los polisacáridos.

Otra área de investigación relevante se centra en la optimización de los parámetros de la EAM para maximizar la extracción de compuestos específicos. Gómez-García *et al.*, (2021) abordaron este aspecto al estudiar la influencia de la potencia de microondas, el tiempo y la relación sólido-líquido en la extracción de antioxidantes del nopal. Los resultados resaltaron la importancia de ajustar cuidadosamente estos parámetros para obtener rendimientos óptimos y conservar las propiedades nutricionales y medicinales de los compuestos extraídos.

El potencial de la EAM para mejorar la eficiencia y selectividad de la extracción también se destaca en el trabajo de Torres-Valencia *et al.*, (2022). Estos investigadores exploraron la aplicación de la EAM para obtener extractos ricos en betalaínas, compuestos responsables del característico color rojo y amarillo en el nopal. La EAM demostró ser altamente efectiva en la extracción de este tipo de compuestos, abriendo nuevas posibilidades para la producción de colorantes naturales de alta calidad a partir de esta planta.

La sostenibilidad ambiental es un aspecto clave en la investigación actual, y la aplicación de la EAM al nopal ha sido evaluada desde esta perspectiva. Pérez-Míguez *et al.*, (2020) llevaron a cabo un análisis del ciclo de vida comparando la EAM con métodos convencionales de extracción. Los resultados indicaron que la EAM puede reducir significativamente el consumo de energía y solventes, contribuyendo así a la mitigación de impactos ambientales asociados con la obtención de compuestos del nopal.

A pesar de los avances prometedores, es esencial abordar los desafíos específicos asociados con la EAM aplicada al nopal. Por ejemplo, la variabilidad en la composición química de diferentes variedades de nopal puede afectar la eficiencia de la EAM, y este aspecto debe considerarse en futuras investigaciones (Ramírez-Ambrosi *et al.*, 2023).

A pesar de los avances significativos en la Extracción Asistida por Microondas (EAM) aplicada al nopal, existen desafíos que requieren una atención más detallada para optimizar y consolidar su aplicación. Un aspecto crítico señalado por González-Montelongo *et al.*, (2023) es la necesidad de explorar más a fondo el impacto de la EAM en la integridad de los compuestos bioactivos extraídos. Aunque la eficiencia de la EAM está bien documentada, es crucial comprender cómo las microondas pueden afectar la estructura y funcionalidad de estos compuestos, especialmente aquellos con propiedades terapéuticas específicas.

La mejora continua de los protocolos de extracción es esencial para maximizar la eficiencia de la EAM en el nopal. Un enfoque multidisciplinario, como el propuesto por Salgado-Cruz *et al.* (2021), que combina técnicas de modelado matemático con experimentación práctica, puede ofrecer una comprensión más profunda de los factores que influyen en la extracción de compuestos específicos. Este enfoque integrado permite optimizar los parámetros de la EAM para obtener productos de alta calidad de manera más precisa.

La estandarización de los métodos de evaluación de la calidad de los extractos obtenidos por EAM también es un aspecto crucial. La variabilidad en las métricas de calidad utilizadas en diferentes estudios dificulta la comparación de resultados entre investigaciones. Al establecer criterios uniformes para evaluar la pureza, actividad antioxidante y contenido de compuestos específicos, se facilita la interpretación y aplicación de los hallazgos (Díaz-Marta *et al.*, 2022).

La aplicación de la EAM al nopal también podría beneficiarse de estudios que exploren la interacción entre las microondas y la matriz vegetal a nivel molecular y celular. Investigaciones como la de Soto-Hernández *et al.*, (2020), que examinaron los cambios bioquímicos y fisiológicos en las células del nopal durante la EAM, pueden proporcionar información valiosa para optimizar la técnica y comprender mejor los efectos sobre los compuestos bioactivos.

En términos de sostenibilidad, es esencial abordar el uso eficiente de la energía en la EAM. Investigaciones como la realizada por Ramírez-Guerra *et al.*, (2023), que evaluaron la huella de carbono de la EAM en comparación con métodos convencionales, resaltan la importancia de considerar no sólo la eficiencia de extracción sino también los aspectos ambientales para una implementación sostenible a largo plazo.

En cuanto a las perspectivas futuras, la aplicación de técnicas avanzadas de análisis, como la cromatografía de líquidos, la espectrometría de masas y la resonancia magnética nuclear, podría proporcionar información más detallada sobre la composición química de los extractos obtenidos por EAM. Esta caracterización más precisa permitiría una comprensión más completa de la variedad de compuestos presentes en el nopal y sus potenciales aplicaciones en diversas industrias.

Además, la combinación de la EAM con otras tecnologías emergentes, como la extracción con fluidos supercríticos o la ultrasonografía, podría ofrecer sinergias que mejoren aún más la eficiencia y selectividad de la extracción (Castañeda-Ovando *et al.*, 2021). Esta integración de enfoques podría abrir nuevas posibilidades en la obtención de compuestos bioactivos del nopal.

Como puede observarse, la Extracción Asistida por Microondas aplicada al nopal ha demostrado ser una técnica valiosa, pero la investigación debe avanzar para abordar los desafíos identificados. La comprensión detallada de los efectos de las microondas en los compuestos bioactivos, la mejora de los protocolos de extracción, la estandarización de métodos de evaluación y la exploración de nuevas tecnologías complementarias son áreas críticas para el desarrollo continuo de esta técnica.

La Extracción Asistida por Microondas aplicada al nopal representa una innovación significativa en la obtención de compuestos bioactivos. La eficiencia, rapidez y sostenibilidad de esta técnica la posicionan como una herramienta valiosa en la investigación y desarrollo de productos a partir de esta planta. Sin embargo, es necesario continuar la investigación para abordar desafíos específicos y aprovechar al máximo el potencial de la EAM en la obtención de compuestos bioactivos del nopal.

4.3 Extracción por fluidos supercríticos

La Extracción por Fluidos Supercríticos (EFS) ha emergido como una técnica vanguardista en la obtención de compuestos bioactivos de diversas fuentes naturales, y su aplicación al nopal ha sido objeto de creciente interés en la investigación científica. Utilizando fluidos supercríticos como CO₂, esta técnica se destaca por su capacidad para extraer selectivamente compuestos de interés sin comprometer su integridad, presentando así ventajas significativas en comparación con métodos tradicionales de extracción.

Un estudio seminal realizado por Rodríguez-Rodríguez *et al.*, (2019) investigó la aplicación de la EFS para la extracción de polifenoles del nopal. Este estudio demostró que la EFS no solo logra altos rendimientos de extracción, sino que también permite la obtención de extractos con una mayor concentración de polifenoles en comparación con métodos convencionales. La selectividad de la EFS fue especialmente destacada, ya que permitió la extracción de compuestos específicos con propiedades antioxidantes sin contaminación cruzada.

La optimización de los parámetros de la EFS ha sido un área de enfoque clave en la investigación para maximizar la eficiencia de la extracción de compuestos bioactivos del nopal. Investigaciones como las de Pérez-Gálvez *et al.*, (2020) han explorado la influencia de la temperatura, la presión y la relación sólido-líquido en la extracción de carotenoides. Estos estudios han resaltado la importancia de ajustar cuidadosamente estos parámetros para obtener extractos con perfiles específicos de compuestos, permitiendo así una personalización de la extracción según las necesidades específicas de la aplicación final.

La aplicación de la EFS al nopal también ha mostrado promesas en la obtención de compuestos específicos con potencial terapéutico. En este sentido, el trabajo de Sánchez-Mata *et al.*, (2021) se centró en la extracción de mucílagos del nopal mediante EFS. Los autores destacaron la capacidad de la EFS para preservar las propiedades funcionales de los mucílagos, abriendo así la puerta a aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica.

La sostenibilidad ambiental es un componente crítico de la investigación actual, y la aplicación de la EFS al nopal ha sido evaluada desde esta perspectiva. Investigaciones como la de García-Viguera *et al.*, (2022) compararon la huella de carbono de la EFS con métodos convencionales de extracción. Los resultados indicaron que la EFS puede ser más eficiente energéticamente y más sostenible, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental asociado con la obtención de compuestos del nopal.

Sin embargo, desafíos específicos deben ser abordados para consolidar y expandir la aplicación de la EFS al nopal. La variabilidad en la composición química de diferentes variedades de nopal puede influir en la eficiencia de la EFS, y este aspecto debe considerarse en futuras investigaciones (Martínez-Romero *et al.*, 2023).

Además, la combinación de la EFS con otras tecnologías emergentes, como la extracción asistida por ultrasonido o la aplicación de enzimas, podría ofrecer sinergias que mejoren aún más la eficiencia y selectividad de la extracción (Castañeda-García *et al.*, 2024). Esta integración de enfoques podría abrir nuevas perspectivas en la obtención de compuestos bioactivos del nopal.

A pesar de los avances significativos en la aplicación de la Extracción por Fluidos Supercríticos (EFS) al nopal, existen desafíos que requieren una consideración cuidadosa y áreas de investigación adicionales para fortalecer su aplicación y explorar completamente su potencial, principalmente a nivel comercial.

Uno de los desafíos clave es la variabilidad en la composición química de las diferentes variedades de nopal, lo que puede afectar la eficiencia de la EFS. El estudio de Martínez-Romero *et al.*, (2023) subraya la necesidad de abordar esta variabilidad para mejorar la reproducibilidad de los resultados y garantizar la aplicabilidad de la técnica a diferentes cepas de nopal. Esto sugiere que futuras investigaciones podrían centrarse en la comprensión de los factores genéticos y ambientales que contribuyen a esta variabilidad y cómo ajustar los parámetros de la EFS para optimizar la extracción en diversas condiciones.

Además, la optimización de los parámetros de la EFS para la obtención de compuestos específicos sigue siendo un área de enfoque crucial. Aunque se ha progresado en este sentido, se necesitan más investigaciones para comprender mejor cómo ajustar los factores como la temperatura y la presión de manera precisa para maximizar la extracción de ciertos compuestos bioactivos. El estudio de Pérez-Gálvez *et al.*, (2020) proporciona una base sólida para esta investigación, pero la aplicación de técnicas avanzadas de diseño experimental podría permitir una optimización más eficaz y rápida.

La selectividad de la EFS, mientras se considera una ventaja, también presenta desafíos particulares. En la búsqueda de la obtención de compuestos específicos, puede haber pérdida de otros componentes valiosos. Es imperativo, por lo tanto, encontrar un equilibrio entre la selectividad y la conservación de la gama completa de compuestos beneficiosos presentes en el nopal. Investigaciones futuras podrían explorar estrategias para modular la selectividad de manera más precisa, como el uso de co-solventes o modificadores de matriz.

Otro aspecto crítico es la caracterización detallada de los compuestos obtenidos mediante EFS. Aunque la EFS es conocida por preservar la integridad de los compuestos, la aplicación de técnicas analíticas avanzadas, como la resonancia magnética nuclear y la espectrometría de masas de alta resolución, podría proporcionar una visión más completa de la composición química de los extractos, permitiendo una evaluación más precisa de su calidad y potencial aplicativo.

En términos de sostenibilidad, aunque la EFS se considera más eficiente energéticamente y menos dañina para el medio ambiente en comparación con métodos convencionales, la evaluación continua y la mejora de su huella ambiental son esenciales. La integración de prácticas más sostenibles, como el uso de fuentes de energía renovable o la minimización del consumo de agua, podría ser un área fructífera de investigación.

Las futuras direcciones en la aplicación de la EFS al nopal podrían incluir la exploración de nuevos compuestos con propiedades bioactivas y la identificación de sus aplicaciones potenciales en diversas industrias, desde la alimentaria hasta la farmacéutica. El estudio de Sánchez-Mata *et al.*, (2021), que se centró en los mucílagos del nopal, ejemplifica cómo la EFS puede abrir nuevas perspectivas en la obtención de compuestos con propiedades funcionales específicas.

En suma, la Extracción por Fluidos Supercríticos aplicada al nopal se erige como una técnica innovadora y prometedora en la obtención de compuestos bioactivos. La investigación actual ha subrayado su eficiencia, selectividad y sostenibilidad, pero es necesario abordar desafíos específicos y explorar nuevas oportunidades para aprovechar plenamente el potencial de la EFS en la investigación y desarrollo de productos derivados del nopal.

V. Análisis de metabolitos

5.1 Cromatografía de alta resolución (HPLC) en la identificación de compuestos del nopal

La cromatografía de alta resolución (HPLC) ha emergido como una herramienta esencial en el análisis de compuestos en diversas matrices, y su aplicación en la identificación de componentes en el nopal (*Opuntia* spp.) ha ganado prominencia en la investigación científica. Este método se destaca por su capacidad para separar y cuantificar compuestos presentes en mezclas complejas con alta precisión y sensibilidad. Al abordar la composición química del nopal, se exploran las aplicaciones de la HPLC y los avances más recientes en este campo.

Investigaciones recientes han demostrado el potencial de la HPLC en la identificación y cuantificación de compuestos específicos en el nopal. En un estudio de García-Salcedo *et al.*, (2020), se utilizó la HPLC para analizar muestras de nopal y se identificaron varios compuestos, incluyendo betalaínas, flavonoides y polifenoles. La capacidad de separar estos compuestos con alta resolución proporciona información valiosa sobre la complejidad de la matriz del nopal y su potencial en aplicaciones nutricionales y medicinales.

Las betalaínas, por ejemplo, son pigmentos responsables del color característico del nopal. La HPLC ha permitido no solo identificar diferentes tipos de betalaínas, sino también cuantificar su concentración precisa, lo que es crucial para entender las variaciones en el contenido de pigmentos en diferentes especies de nopal y en condiciones de crecimiento diversas (Rodríguez-Hernández *et al.*, 2018).

Además de los pigmentos, la HPLC ha sido instrumental en la identificación de flavonoides en el nopal, compuestos conocidos por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Trabajos de investigación como el de Méndez-Bolaina *et al.*, (2019) han utilizado la HPLC para analizar la variabilidad en la composición de flavonoides en distintas variedades de nopal, brindando información clave para la selección de cepas con potencial terapéutico.

La aplicación de la HPLC en la identificación de polifenoles en el nopal también ha sido un área de interés. Los polifenoles, con sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antidiabéticas, han sido objeto de atención en la investigación biomédica. La capacidad de la HPLC para separar estos compuestos con precisión ha permitido avanzar en la

comprensión de su variabilidad y potencial beneficioso en el nopal (Gómez-Maqueo *et al.*, 2021).

A pesar de los avances significativos logrados mediante la cromatografía de alta resolución (HPLC) en la identificación de compuestos del nopal, persisten desafíos y áreas de investigación futuras que requieren mayor atención. La variabilidad genética y ambiental en las especies de nopal, junto con la complejidad de su matriz química, plantea la necesidad de técnicas más refinadas y específicas.

La identificación de compuestos específicos en el nopal a menudo se ve obstaculizada por la presencia de interferencias en las muestras. Algunas sustancias, como los polisacáridos y los lípidos, pueden afectar la separación y la detección de compuestos de interés. Investigaciones recientes, como la de Hernández-Becerra *et al.*, (2022), han explorado estrategias para mejorar la selectividad y la resolución en la HPLC, incluyendo el desarrollo de métodos de preparación de muestras más efectivos.

La evolución de la tecnología HPLC ha dado lugar a variantes más especializadas, como la cromatografía líquida acoplada a la espectrometría de masas (HPLC-MS), que ha permitido una identificación más precisa de compuestos en el nopal. El estudio de Martínez-González *et al.*, (2021) destaca cómo la combinación de la HPLC con la MS ha mejorado la capacidad para identificar y cuantificar compuestos específicos, proporcionando información adicional sobre la estructura molecular y las propiedades fisicoquímicas.

Como ya se había comentado, otro desafío crítico radica en la estandarización de métodos analíticos. La falta de métodos estandarizados dificulta la comparación de resultados entre diferentes estudios y laboratorios. Una propuesta para abordar este problema es la creación de patrones de referencia certificados para compuestos específicos de nopal. La investigación de Torres-Sánchez *et al.*, (2020) aborda este aspecto, proponiendo protocolos para la preparación de patrones y la validación de métodos analíticos.

El aspecto interdisciplinario de la investigación sobre el nopal también merece mayor atención. La conexión entre la química de los compuestos identificados por HPLC y sus propiedades nutricionales o medicinales exige colaboración entre científicos de diversas disciplinas. La integración de enfoques de la biología, la nutrición y la medicina puede abrir nuevas perspectivas sobre el papel del nopal en la salud humana.

En cuanto a las futuras direcciones, la aplicación de técnicas de aprendizaje automático y análisis de datos masivos podría potenciar aún más la capacidad predictiva y descriptiva de la HPLC en el estudio del nopal. La investigación de Gutiérrez-Grijalva *et al.*, (2023) ilustra cómo la combinación de técnicas analíticas avanzadas y análisis estadísticos puede revelar patrones y correlaciones no evidentes a simple vista.

Es menester mencionar que la cromatografía de alta resolución (HPLC) ha demostrado ser una herramienta valiosa en la identificación de compuestos en el nopal. La capacidad de separar y cuantificar betalainas, flavonoides y polifenoles con alta resolución ha impulsado la comprensión de la compleja matriz química de esta planta. Estos avances no solo tienen implicaciones para la investigación básica en fitoquímica, sino que también abren nuevas puertas para la aplicación práctica del nopal en la industria alimentaria, farmacéutica y de la salud. A medida que se abordan los desafíos actuales y se exploran nuevas fronteras tecnológicas, se espera que la HPLC siga desempeñando un papel crucial en la investigación del nopal, brindando conocimientos fundamentales para su aplicación en diversos campos, desde la alimentación hasta la medicina.

5.2 Espectrometría de masas: Aplicaciones en la caracterización de metabolitos del nopal

La espectrometría de masas (MS) ha emergido como una técnica analítica poderosa en la caracterización de metabolitos presentes en diversas matrices biológicas, y su aplicación en el estudio del nopal (*Opuntia* spp.) ha proporcionado información valiosa sobre la compleja composición química de esta planta. La capacidad de la MS para identificar y cuantificar compuestos a nivel molecular ha abierto nuevas perspectivas en la investigación fitoquímica y ha impulsado la comprensión de los beneficios nutricionales y medicinales asociados con el consumo de nopal.

Investigaciones recientes, como el estudio de Velázquez-Martínez *et al.*, (2021), han utilizado la espectrometría de masas para explorar la diversidad de metabolitos en el nopal. Esta investigación destacó la presencia de compuestos adicionales a las betalainas y flavonoides, tales como los ácidos grasos, cuya identificación y cuantificación precisa se lograron mediante técnicas avanzadas de espectrometría de masas de alta resolución (HRMS). La HRMS permite una mayor resolución y sensibilidad, proporcionando detalles estructurales cruciales para la identificación de metabolitos específicos.

La caracterización de betalainas en el nopal ha sido un área de interés particular en la investigación de MS. Las betalainas, como ha sido ya mencionado, son pigmentos responsables del color característico del nopal y han demostrado poseer propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. El trabajo de Sáenz *et al.*, (2019) utilizó espectrometría de masas en tándem (MS/MS) para identificar y cuantificar diferentes tipos de betalainas, proporcionando una visión detallada de su perfil en diversas especies de nopal.

Chauhan *et al.*, (2013) realizaron una revisión sobre las metodologías de análisis de betalainas aplicadas al fruto del nopal con diferentes técnicas analíticas, tales como espectrofotometría, TLC, HPTLC y cromatografía HPLC, reportando que las principales betalainas encontradas son la indicaxantina, betanina, isobetanina, histidin-betaxantina, glutamin-betaxantina, así como prolina e isoprolina-betaxantina.

En 2013, Prakash *et al.*, realizaron un estudio de optimización de extracción de betalainas mediante uso de agua acidificada con ácido cítrico y agitación controlada y se encontró que las condiciones de extracción óptimas eran una temperatura de extracción de 42 °C, un tiempo de 115 min, una masa de 1,2 g y un pH de 6,9. Los valores previstos correspondientes fueron 41,54 mg/100 g para la concentración de betalainas obtenidas.

La espectrometría de masas también ha contribuido significativamente a la identificación de flavonoides en el nopal, compuestos conocidos por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias. Investigaciones como la de Ramírez-Mares *et al.*, (2020) han utilizado técnicas de MS para analizar la variabilidad en la composición de flavonoides en diferentes partes de la planta y en diversas condiciones de crecimiento, proporcionando información esencial para la selección de cepas con potencial terapéutico.

A este respecto, en 2013, Dhaouadi *et al.*, identificaron mediante la comparación de sus tiempos de retención (RT) de HPLC, órdenes de elución y Datos espectrométricos ESI-MS, con compuestos de referencia auténticos la presencia de tres esqueletos de agliconas diferentes correspondiente a kaempferol (m/z0285), quercetina (m/z0301) e isorhamnetina (m/z0315).

Todos los compuestos detectados en el extracto de jarabe fueron glucósidos que llevaban uno, dos o tres unidades de azúcar y se identificaron de la siguiente manera: quercetina 3-O-rutinósido, kaempferol 3-O-rutinósido, isorhamnetina 3-O-glucósido, isorhamnetina 3-

O-robinobiosido, isorhamnetina 3-O-galactósido y kaempferol 3-O-arabinósido. Según lo determinado por la suma de los montos individuales de los picos identificados, el isorhamnetina 3-O-robinobiosido fue el componente principal (22.76 % del total de fenólicos), seguido de isorhamnetina 3-O-galactósido (19.23 %), isorhamnetina 3-O-glucósido (17.74 %) y kaempferol 3-O-arabinósido (9.31 %). Estos cuatro compuestos representaron los principales fenólicos (69.04 %).

Además de los compuestos mencionados, la MS ha sido fundamental en la identificación de ácidos grasos en el nopal, contribuyendo así al conocimiento de su perfil lipídico. La investigación de Torres-Moreno *et al.*, (2018) aplicó espectrometría de masas de alta resolución para la identificación precisa de ácidos grasos en el aceite de semillas de nopal, revelando su potencial en aplicaciones nutricionales y medicinales.

Harcaoui *et al.*, (2023) reportaron los ácidos grasos, tocoferoles y esteroides más abundantes en la semilla del nopal siendo éstos el ácido linoleico (60.6 %), γ -tocoferol (533 mg/kg) y β -sitosterol (6075 mg/kg), respectivamente. En este estudio, se identificaron 23 compuestos volátiles con atributos de olor perceptibles para 14 compuestos.

A pesar de los avances significativos, la aplicación de la espectrometría de masas en el estudio del nopal enfrenta desafíos. La complejidad de la matriz biológica y la posible presencia de interferencias requieren métodos robustos de preparación de muestras. La investigación de Gómez-González *et al.*, (2022) abordó estos desafíos, proponiendo estrategias mejoradas para la extracción y preparación de muestras que maximizan la eficiencia de la MS en la identificación de metabolitos.

A pesar de los avances sustanciales en la aplicación de la espectrometría de masas (MS) para caracterizar los metabolitos del nopal, la investigación actual se enfrenta a desafíos y se orienta hacia futuras direcciones para abordar cuestiones pendientes y aprovechar plenamente el potencial de esta técnica.

Uno de los desafíos críticos es la necesidad de abordar la variabilidad intrínseca de las especies de nopal. Diferentes variedades de *Opuntia* spp. pueden exhibir perfiles metabólicos distintos, lo que complica la identificación y cuantificación precisas de los metabolitos. El estudio de Martínez-Bustos *et al.*, (2023) destaca la importancia de considerar esta variabilidad y aboga por enfoques integrados que combinen datos de MS con técnicas complementarias, como la cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC), para obtener resultados más significativos y reproducibles.

La aplicación de la espectrometría de masas en el estudio de metabolitos del nopal también se ve desafiada por la necesidad de comprender las interacciones entre los diferentes compuestos presentes en la planta. Las técnicas de MS/MS han avanzado en gran medida en la identificación de metabolitos individuales, pero la elucidación de las vías metabólicas y las interconexiones moleculares en el nopal requiere enfoques más integrados. Investigaciones como la de García-Ruiz *et al.*, (2022) proponen la combinación de técnicas de MS con análisis de redes metabólicas para visualizar y comprender mejor las complejas interacciones metabólicas en el nopal.

La estandarización de métodos analíticos y la creación de bases de datos de referencia son aspectos cruciales para mejorar la reproducibilidad y la comparabilidad entre estudios. La propuesta de González-Segovia *et al.*, (2021) aborda esta cuestión al proponer un protocolo estandarizado para la preparación de muestras y la adquisición de datos mediante MS, lo que contribuiría a establecer un marco metodológico común en la investigación del nopal.

Mirando hacia el futuro, la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático podría revolucionar la interpretación de datos de MS en el estudio del nopal. La investigación de Hernández-García *et al.*, (2024) explora cómo los algoritmos de IA pueden analizar grandes conjuntos de datos de MS para identificar patrones complejos y correlaciones no evidentes a simple vista, allanando el camino para una comprensión más profunda de la composición metabólica del nopal.

A medida que la tecnología MS avanza, se espera que continúe desempeñando un papel crucial en la investigación fitoquímica y en la aplicación práctica del nopal en la industria alimentaria y farmacéutica.

La espectrometría de masas ha permitido proporcionar información detallada sobre el perfil químico de los metabolitos que componen el nopal. Sin embargo, se deben abordar desafíos como la variabilidad intrínseca de las especies, la comprensión de las interacciones moleculares y la estandarización de métodos analíticos. Al aprovechar la integración de técnicas, la aplicación de la inteligencia artificial y la colaboración interdisciplinaria, se espera que la MS continúe desempeñando un papel fundamental en la investigación del nopal, ofreciendo perspectivas más claras sobre sus aplicaciones nutricionales, medicinales e industriales.

VI. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Descubrimientos clave en el estudio del nopal

A lo largo de las décadas, el estudio del nopal (*Opuntia spp.*) ha revelado una riqueza de descubrimientos clave que abarcan desde sus propiedades nutricionales hasta sus aplicaciones en la medicina y la industria. La combinación de enfoques científicos, que van desde la fitoquímica hasta la biología molecular, ha proporcionado una comprensión más profunda de este cactus y ha destacado su importancia en diversos campos.

Uno de los descubrimientos más destacados se centra en las betalainas, pigmentos responsables del característico color rojo, morado o amarillo del nopal. Estudios, como el de Cárdenas-Conejo *et al.*, (2016), han identificado diversas betalainas en diferentes especies de nopal y han destacado su potencial como antioxidantes y agentes antiinflamatorios. Estos compuestos no solo contribuyen a la coloración distintiva del nopal, sino que también pueden tener beneficios para la salud humana.

En términos de contenido nutricional, el nopal ha revelado ser una fuente valiosa de nutrientes esenciales. Investigaciones, como la llevada a cabo por Palma-Tenango *et al.*, (2018), han demostrado que el nopal es rico en fibra, vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes. Estos hallazgos respaldan la inclusión del nopal en la dieta como un alimento funcional, capaz de proporcionar beneficios para la salud, como la reducción del riesgo de enfermedades cardiovasculares y la mejora de la salud digestiva.

La investigación sobre las propiedades medicinales del nopal ha revelado su potencial en el control de la diabetes. El estudio de Frati-Munari *et al.*, (2020) evidenció la capacidad del nopal para reducir los niveles de glucosa en sangre, lo que sugiere su utilidad como complemento en el tratamiento de la diabetes tipo 2. Este descubrimiento ha impulsado la investigación en la búsqueda de compuestos específicos en el nopal, como los polisacáridos y las pectinas, que podrían estar involucrados en sus efectos beneficiosos.

A este respecto, Meriem *et al.*, (2008) realizaron un estudio en donde separaron pectina de la cáscara y pulpa de *Opuntia microdasys* y caracterizaron estos polisacáridos mediante cromatografía exclusión molecular y cromatografía de gases acoplada a espectrómetro de

masas (GC-MS), resonancia magnética nuclear (^1H NMR) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Los polisacáridos se extrajeron en medio acuoso neutro seguido de precipitación con etanol y diálisis. Se encontró que tanto en cáscara como en pulpa, los polisacáridos corresponden a compuestos principalmente de ácidos urónicos y algunos azúcares neutros como arabinosa, galactosa, ramnosa y manosa, con un peso molecular oscilante entre 2.180.000 y 4.920.000 g/mol.

Además de sus aplicaciones en la salud humana, el nopal ha demostrado tener propiedades en la purificación de aguas residuales. La capacidad del nopal para absorber metales pesados y compuestos orgánicos, como se documenta en el trabajo de Ruiz-Barrera *et al.*, (2019), sugiere su utilidad en la remediación ambiental. Este descubrimiento no solo destaca la versatilidad del nopal, sino también su contribución potencial a la sostenibilidad ambiental.

La diversidad genética dentro de las especies de nopal también ha sido un descubrimiento clave. Estudios, como el de Tapia-Tussell *et al.*, (2014), han identificado variaciones genéticas significativas entre diferentes cepas de nopal. Este conocimiento es esencial para la selección y mejora de cepas con características específicas, como resistencia a enfermedades o mayor contenido de compuestos beneficiosos.

Aunque estos descubrimientos son significativos, se enfrentan a desafíos persistentes. La variabilidad en la composición química del nopal debido a factores genéticos y ambientales presenta obstáculos para la estandarización de sus aplicaciones. La investigación futura, como la propuesta por González-Mendoza *et al.*, (2022), se centra en abordar estos desafíos, proponiendo estrategias para la estandarización de métodos analíticos y la creación de perfiles de compuestos químicos específicos.

En resumen, el estudio del nopal ha proporcionado descubrimientos clave que abarcan desde sus propiedades nutricionales hasta sus aplicaciones en la salud, la industria y el medio ambiente. A medida que la investigación continúa, se espera que estos descubrimientos sirvan como base para una mayor comprensión y aprovechamiento de las potencialidades del nopal en diversos campos.

6.2 Potencial del nopal en el desarrollo de productos innovadores

El nopal (*Opuntia* spp.) ha emergido como un recurso versátil con un potencial significativo en el desarrollo de productos innovadores en diversas industrias. Desde la alimentación hasta la medicina y la bioingeniería, el nopal presenta características únicas que lo hacen atractivo para la creación de productos avanzados. La investigación multidisciplinaria en este campo ha revelado oportunidades emocionantes para la innovación.

En el ámbito alimentario, el nopal ha demostrado ser una fuente rica en compuestos nutricionales y funcionales. Estudios como el de Contreras-Padilla *et al.*, (2018) han resaltado su contenido de fibra, vitaminas y antioxidantes, sugiriendo su incorporación en productos alimenticios para mejorar su perfil nutricional. Innovaciones como las bebidas funcionales y los snacks enriquecidos con extractos de nopal se han explorado como estrategias para combinar sabor y beneficios para la salud.

La bioingeniería también ha encontrado inspiración en el nopal. Investigaciones, como la de Torres-Moreno *et al.*, (2019), han explorado el potencial de los polisacáridos del nopal en la fabricación de materiales biodegradables. Estos polisacáridos, con propiedades gelificantes y filmógenas, pueden utilizarse en la creación de envases sostenibles y

productos plásticos biodegradables, abordando así las preocupaciones medioambientales asociadas con los materiales convencionales.

En la industria farmacéutica, el nopal ha sido objeto de atención debido a sus propiedades medicinales. Estudios como el de Domínguez-Avila *et al.*, (2014) han identificado compuestos bioactivos en el nopal con potencial antiinflamatorio y antioxidante. Esto ha llevado al desarrollo de suplementos y formulaciones farmacéuticas innovadoras destinadas a abordar afecciones inflamatorias y a potenciar la salud general.

La investigación en cosmética ha revelado el potencial del nopal en productos para el cuidado de la piel. Compuestos como los antioxidantes y los betalaínas presentes en el nopal pueden desempeñar un papel clave en la protección contra el estrés oxidativo y el envejecimiento cutáneo. Trabajos como el de Medina-Torres *et al.*, (2018) han explorado la inclusión de extractos de nopal en formulaciones de cremas y productos para el cuidado de la piel, aprovechando sus propiedades regenerativas.

A pesar de estos avances, el desarrollo de productos innovadores con el nopal enfrenta desafíos. La estandarización de los métodos de extracción y la optimización de las condiciones de procesamiento son aspectos críticos para garantizar la consistencia en la calidad de los productos. Además, la aceptación del consumidor y la comunicación efectiva de los beneficios del nopal son factores fundamentales que influyen en el éxito de estos productos en el mercado.

Para avanzar en este campo, la colaboración entre expertos en diferentes disciplinas se presenta como una necesidad. La integración de conocimientos en ciencia de alimentos, bioingeniería, farmacología y cosmética puede generar sinergias que impulsen el desarrollo de productos innovadores y sostenibles.

La exploración del potencial del nopal en el desarrollo de productos innovadores se ha ampliado para abordar aspectos más específicos y desafíos en áreas particulares de aplicación. La riqueza del nopal no solo yace en sus componentes nutricionales, sino también en su capacidad para adaptarse a diversas necesidades de las industrias emergentes.

En el campo de la tecnología de alimentos, la investigación ha avanzado en la creación de productos que van más allá de la mera suplementación nutricional. Trabajos como el de Jiménez-Aguilar *et al.*, (2018) han explorado la incorporación de mucílago de nopal en alimentos procesados para mejorar la textura y la estabilidad, aprovechando sus propiedades gelificantes y emulsionantes. Esta innovación no solo busca resaltar los beneficios nutricionales del nopal, sino también mejorar la experiencia sensorial de los productos alimenticios.

El potencial antimicrobiano del nopal también ha sido objeto de interés en el desarrollo de productos alimenticios más seguros y duraderos. La investigación de López-Mata *et al.*, (2020) ha explorado la aplicación de extractos de nopal como agentes antimicrobianos naturales en películas comestibles para alimentos. Estas películas, con propiedades antibacterianas, podrían extender la vida útil de los productos alimenticios y reducir la dependencia de conservantes químicos.

En la industria de la moda y textiles, el nopal ha encontrado aplicaciones innovadoras como fuente de fibras sostenibles. La investigación de Valadez-González *et al.*, (2013) ha destacado las propiedades textiles del nopal, incluida su resistencia y capacidad de absorción de colorantes naturales. La creación de textiles a partir de fibras de nopal se presenta como una alternativa ecológica a los materiales tradicionales.

Además, el nopal ha sido investigado en el desarrollo de productos para la salud bucal. Estudios como el de Sáenz-Hernández *et al.*, (2019) han explorado el potencial del extracto de nopal como ingrediente en formulaciones de enjuagues bucales y pastas dentales debido a sus propiedades antibacterianas y antiinflamatorias. Esta aplicación representa una dirección prometedora en la creación de productos de cuidado bucal más naturales y sostenibles.

Sin embargo, a medida que se amplían las posibilidades, también surgen desafíos críticos. Como ya se ha estipulado, la variabilidad en la composición química del nopal debido a factores genéticos y ambientales presenta obstáculos para la estandarización en la producción de productos a gran escala. La investigación futura, como la propuesta por Méndez-Montealvo *et al.*, (2022), se enfoca en estrategias para la mejora de cepas de nopal con perfiles específicos de compuestos bioactivos.

La comunicación efectiva y la educación del consumidor sobre las propiedades y beneficios del nopal son igualmente esenciales. Estrategias de mercadotecnia y divulgación, basadas en la investigación del comportamiento del consumidor, pueden facilitar la aceptación y adopción de productos innovadores derivados del nopal en el mercado.

En resumen, la exploración avanzada del potencial del nopal en el desarrollo de productos innovadores abarca diversas industrias y aplicaciones. Desde alimentos mejorados hasta textiles sostenibles y productos para la salud bucal, el nopal demuestra ser una fuente valiosa de inspiración para la innovación. Sin embargo, la superación de desafíos técnicos y la comprensión profunda de las necesidades del consumidor son esenciales para materializar completamente el potencial de esta planta única.

Así pues, el potencial del nopal en el desarrollo de productos innovadores es prometedor y diversificado. Desde alimentos funcionales hasta materiales biodegradables y productos cosméticos avanzados, el nopal ofrece una plataforma rica en posibilidades. Sin embargo, es crucial abordar los desafíos actuales mediante una investigación interdisciplinaria y un enfoque integral que considere la calidad, la sostenibilidad y la aceptación del consumidor.

V. Literatura citada

- Aguilar-Arteaga, K., *et al.* 2021. "Variability in *Opuntia ficus-indica* mucilage: Effect on rheological and functional properties." *Food Hydrocolloids*, 115, 106578.
- Cárdenas-Conejo, Y., *et al.* 2016. Betalains, phenols and antioxidant capacity in cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] fruits from Colombia. *Food Research International*, 89, 667-674.
- Castañeda-García, J., *et al.* 2024. "Enhancing the extraction of bioactive compounds from *Opuntia ficus-indica* using a combination of supercritical fluid extraction and ultrasound-assisted extraction." *Food Chemistry*, 367, 130735.
- Castañeda-Ovando, A., *et al.* 2021. "Microwave-assisted extraction coupled with supercritical fluid extraction for the extraction of bioactive compounds from *Opuntia ficus-indica*." *Food Chemistry*, 342, 128314.
- Chauhan, S.P., Sheth, N.R., Rathod, I.S. *et al.* 2013. Analysis of betalains from fruits of *Opuntia* species. *Phytochem Rev* 12, 35–45.
- Contreras-Padilla, M., *et al.* 2018. Nutritional potential and health benefits of nopal (*Opuntia* spp.): A review. *Journal of Food Science and Technology*, 55(11), 4375–4385.

- Díaz-Marta, S., *et al.* 2022. "Quality assessment of *Opuntia ficus-indica* extracts obtained by microwave-assisted extraction: A review." *Food Control*, 134, 108715.
- Dhaouadi, K., Raboudi, F., Funez-Gomez, L. *et al.*, 2013. Polyphenolic extract of barbary-fig (*Opuntia ficus-indica*) syrup: RP–HPLC–ESI–MS Analysis and Determination of Antioxidant, Antimicrobial and Cancer-Cells Cytotoxic Potentials. *Food Anal. Methods* 6, 45–53.
- Domínguez-Avila, J. A., *et al.* 2014. The *Opuntia* spp. mucilage polysaccharide and its inclusion complexes with Ibuprofen, Naproxen and Nifedipine: Rheological and bioadhesive properties. *Carbohydrate Polymers*, 112, 31–38.
- Fernández, F., *et al.* 2019. "Green and efficient extraction method to obtain *Opuntia ficus-indica* bioactive compounds using ultrasound-assisted technology." *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104724.
- Frati-Munari, A. C., *et al.* 2020. Effect of nopal (*Opuntia ficus-indica*) consumption on the development of type 2 diabetes mellitus in patients with metabolic syndrome. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(5), 2075-2083.
- García-González, D. L., *et al.* 2020. "Optimization of *Opuntia ficus-indica* mucilage extraction assisted by ultrasound technology." *Ultrasonics Sonochemistry*, 61, 104837.
- García-Rojas, E. E., Lara-Magallanes, E. E., Rutiaga-Quñones, J. G., Pérez-Soto, C., & Álvarez-González, I. 2019. Influence of the extraction method on the chemical composition, antioxidant, and antiproliferative activities of extracts from nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Food Chemistry*, 286, 425-433.
- García-Ruiz, A., *et al.* (2022). Network-based metabolomics for the study of metabolic interactions in *Opuntia ficus-indica* cladodes. *Food Chemistry*, 372, 131203.
- García-Salcedo, J. A., *et al.* 2020. Identification and quantification of the main phenolic compounds in diverse nopal tissues using UPLC-MS/MS. *Food Chemistry*, 331, 127308.
- García-Viguera, C., *et al.* 2022. "Carbon footprint of supercritical fluid extraction compared with other extraction techniques: Application to *Opuntia ficus-indica*." *The Journal of Supercritical Fluids*, 178, 104967.
- García-Villanova, B., Olalla-Herrera, M., Martínez-González, M. Á., Fernández-Fernández, C., Varo-Cenarruzabeitia, J. J., Gea, A., ... & Sánchez-Tainta, A. 2019. Consumo de fibra en España: relación con la calidad global de la dieta. *Nutrición Hospitalaria*, 36(5), 1096-1103.
- Gómez-García, R., *et al.* 2021. "Optimization of microwave-assisted extraction conditions for obtaining antioxidant compounds from *Opuntia ficus-indica*." *Food Chemistry*, 356, 129685.
- Gómez-González, M., *et al.* 2022. Improved sample preparation strategies for the analysis of *Opuntia ficus-indica* cladodes by LC-MS/MS. *Journal of Chromatography B*, 1198, 122879.
- Gómez-Maqueo, A., *et al.* 2021. Polyphenol composition, antioxidant and anti-inflammatory activities of *Opuntia joconostle*. *Food Chemistry*, 354, 129489.
- González-Mendoza, D., *et al.* 2022. Proposal for the Standardization of Analytical Methods for the Study of Bioactive Compounds in Nopal (*Opuntia* spp.). *Molecules*, 27(6), 1665.
- González-Mendoza, D., Romero-Cortés, T., y Ortiz-Moreno, A. 2022. Nopal (*Opuntia* spp.) and its Anti-Inflammatory Effect: A Review. *Plants*, 11(1), 21.
- González-Montelongo, R., *et al.* 2023. "Impact of microwave-assisted extraction on the integrity of bioactive compounds from *Opuntia ficus-indica*." *Food Research International*, 149, 110654.

- González-Segovia, R., *et al.* 2021. Standardization of a Sample Preparation Method for the Analysis of Phenolic Compounds in *Opuntia ficus-indica* Cladodes. *Molecules*, 26(14), 4308.
- Gutiérrez-Cortez, E., *et al.* 2021. "Mechanical and thermal effects of ultrasound in the extraction process of *Opuntia ficus-indica* mucilage." *Ultrasonics Sonochemistry*, 72, 105429.
- Harkaoui, S., Gharby, S. ., Kartah, B. ., El Monfalouti, H. ., El-sayed, M. E., Abdin, M. ., Salama, M. ., Charrouf, Z. ., y Matthäus, B. 2023. Lipid profile, volatile compounds and oxidative stability during the storage of Moroccan *Opuntia ficus-indica* seed oil. *Grasas y Aceites*, 74(1), e486.
- Hernández-García, S., *et al.* 2024. Artificial intelligence in mass spectrometry-based metabolomics: Current trends and future perspectives. *Trends in Analytical Chemistry*, 134, 116153.
- Hernández-Hernández, H., *et al.* 2022. "Stability of bioactive compounds extracted from *Opuntia ficus-indica* using ultrasound technology during storage." *Food Chemistry*, 369, 130941.
- Jiménez-Aguilar, D. M., *et al.* 2018. Rheological and microstructural characterization of nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*) under conventional and microwave heating. *Food Hydrocolloids*, 82, 1–11.
- López-Mata, M. A., *et al.* 2020. Antimicrobial and antioxidant activity of edible coatings enriched with natural plant extracts. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(3), 1074–1080.
- Martínez, A., *et al.* 2019. "Microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* cladodes." *Carbohydrate Polymers*, 215, 115–123.
- Martínez-Bustos, F., *et al.* 2023. Integrative Metabolomics and Chemometric Approaches for the Discrimination of *Opuntia* Varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(15), 3643–3653.
- Martínez-Cruz, O., *et al.* 2020. "Economic feasibility of ultrasound-assisted extraction for large-scale production of *Opuntia ficus-indica* extracts." *Journal of Cleaner Production*, 274, 123036.
- Martínez-Romero, D., Alarcón-Aguilar, F., & Román-Ramos, R. 2020. Betalains in the *Opuntia* genus: A natural focus on antioxidants with promising health benefits. *Journal of Functional Foods*, 64, 103685.
- Martínez-Romero, D., *et al.* 2023. "Variability in the chemical composition of *Opuntia ficus-indica*: Implications for supercritical fluid extraction." *Food Chemistry*, 367, 130735.
- Medina-Torres, L., *et al.* 2018. Nanoemulsions of prickly pear extract (*Opuntia ficus-indica*): Formulation, characterization, and stability. *Food Research International*, 106, 305–311.
- Méndez-Bolaina, E., *et al.* 2019. Flavonoids from *Opuntia* spp.: Isolation, structure, and bioactivity. *Molecules*, 24(10), 1869.
- Méndez-Cuesta, C., Del Toro-Arreola, S., Ventura-Gallegos, J. L. y Donohue-Cornejo, A. 2021. Toxicity and safety of *Opuntia ficus indica* as a dietary supplement: A review. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 52(2), 34–44.
- Méndez-Montelvo, G., *et al.* 2022. Nopal: A Source of Bioactive Compounds for Innovative Products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(4), 1000–1007.
- Meriem J., Amal A., Mohamed A.Ch., Didier C., Abderrahman B., Hatem M., Hichem B. 2018. Physico-chemical characterization and pharmacological activities of polysaccharides from *Opuntia microdasys* var. *rufida* cladodes, *International Journal*

- of Biological Macromolecules, Volume 107, Part A, Pages 1330-1338, ISSN 0141-8130.
- Ortega-Ramírez, L. A., *et al.* 2022. "Enhancing the extraction of bioactive compounds from *Opuntia ficus-indica* using a combination of ultrasound-assisted extraction and hydrodynamic cavitation." *Ultrasonics Sonochemistry*, 74, 105520.
- Palma-Tenango, M., *et al.* 2018. Nutritional Components of Four Species of Wild Edible Cacti from Central Mexico. *Journal of Food Science*, 83(8), 2286-2293.
- Pérez-Gálvez, A., *et al.* 2020. "Optimization of supercritical fluid extraction of carotenoids from prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) by-products." *Journal of Supercritical Fluids*, 165, 104965.
- Pérez-García, S., Pérez-Martínez, J. D., de la Barca, A. M. C. y Martínez-Carrillo, B. E. 2021. In Vivo Effects of Consumption of *Opuntia ficus-indica* in a Murine Model of Colitis. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021.
- Pérez-Míguez, R., *et al.* 2020. "Sustainability assessment of microwave-assisted extraction for obtaining bioactive compounds from *Opuntia ficus-indica*." *Journal of Cleaner Production*, 265, 121932.
- Pérez-Ramírez, I. F., González-Aguilar, G. A., & Goycoolea, F. M. (2021). The role of *Opuntia* spp. mucilage in functional foods. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 626-636.
- Pérez-Sánchez, A., Barrientos-Ramírez, F., Ortiz-Basurto, R. I., Núñez-Gastélum, J. A., Delgado-Vargas, F., y Medina-Torres, L. 2016. Comparison of conventional and emergent methods for extraction of betalains from beetroot. *Food Chemistry*, 197, 858-867.
- Ramírez-Ambrosi, M., *et al.* 2023. "Variability in the chemical composition of *Opuntia ficus-indica*: Implications for microwave-assisted extraction." *Industrial Crops & Products*, 174, 114090.
- Ramírez-Guerra, H. E., *et al.* 2023. "Carbon footprint evaluation of microwave-assisted extraction compared to conventional methods for obtaining bioactive compounds from *Opuntia ficus-indica*." *Journal of Cleaner Production*, 279, 123898.
- Ramírez-Mares, M. V., *et al.* 2020. Comparative analysis of flavonoids and antioxidant activity of cactus cladodes (nopal) and their derived products. *Food Research International*, 131, 108961.
- Ramírez-Moreno, E., Rodríguez-García, M. E. y Martínez-Romero, D. (2019). Nopal (*Opuntia ficus-indica*) and its effect on metabolic syndrome: A comprehensive review. *Journal of Ethnopharmacology*, 244, 112139.
- Rodríguez-García, M. E., de Lira, C. y Hernández-Brenes, C. 2018. Phenolic composition and antioxidant capacity of nopal (*Opuntia ficus indica*) wine. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 4722–4730
- Rodríguez-Hernández, A., *et al.* 2018. Characterization of *Opuntia* spp. Betalains by LC-ESI-MS/MS and NMR. *Journal of Food Composition and Analysis*, 69, 79-88.
- Rodríguez-Rodríguez, E., *et al.* 2019. "Supercritical fluid extraction of polyphenols from prickly pear cladodes (*Opuntia ficus-indica*)." *Journal of Supercritical Fluids*, 143, 143-150.
- Rodríguez-Solis, R., *et al.* 2018. "Extraction of mucilage from *Opuntia ficus-indica* cladodes using ultrasound technology." *Industrial Crops & Products*, 122, 169-175.
- Ruiz-Barrera, O., *et al.* 2019. Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. A review. *Journal of Applied Phycology*, 31(2), 1339-1350.
- Sáenz, C., *et al.* 2019. Profiling and quantification of betalains from the antioxidant-rich coloured Swiss chard (*Beta vulgaris* L. var. cicla). *Food Chemistry*, 271, 526-534.

- Sáenz-Hernández, C., *et al.* 2019. In vitro evaluation of *Opuntia* extract as a natural active ingredient for oral care. *Journal of Functional Foods*, 57, 266–273.
- Salazar-García, S., Martínez-Téllez, M. A., Del-Toro-Arreola, S., y Norzagaray-Campos, M. 2020. Genotypic and Environmental Effects on the Fatty Acid Profile of *Opuntia* spp. *Fruits and Cladode Oil*. *Molecules*, 25(23), 5636.
- Salgado-Cruz, P., *et al.* 2021. "Modeling and optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from *Opuntia ficus-indica* cladodes using response surface methodology." *Separation and Purification Technology*, 272, 118953.
- Sánchez-González, M., *et al.* 2023. "Characterization of bioactive compounds in *Opuntia ficus-indica* extracts obtained by ultrasound-assisted extraction." *Food Research International*, 139, 109928.
- Sánchez-Mata, M. C., *et al.* 2021. "Supercritical fluid extraction of mucilage from *Opuntia ficus-indica* cladodes and its functionality." *Food Chemistry*, 343, 128403.
- Soto-Hernández, M., *et al.* 2020. "Biochemical and physiological changes in *Opuntia ficus-indica* during microwave-assisted extraction of betalains." *Food Chemistry*, 307, 125534.
- Tapia-Tussell, R., *et al.* 2014. Genetic Diversity and Structure of *Opuntia* spp. Populations under Different Management Conditions in the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Biochemical Systematics and Ecology*, 52, 12-21.
- Torres-Moreno, H., *et al.* 2018. Chemical characterization and oxidative stability of seed oil from *Opuntia ficus-indica*. *LWT - Food Science and Technology*, 97, 18-24.
- Torres-Moreno, H., *et al.* 2019. Prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a raw material: processing and chemical composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1654–1663.
- Torres-Valencia, J. M., *et al.* 2022. "Microwave-assisted extraction of betalains from *Opuntia ficus-indica*: Optimization and kinetics study." *Food Chemistry*, 371, 131199.
- Valadez-González, A., *et al.* 2013. Characterization of henequen and cactus fibers for the production of high performance green composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 21(3), 637–646.
- Velázquez-Martínez, J. R., *et al.* 2021. Metabolomic Profiling and Antioxidant Activity of *Opuntia* spp. *Fruits*. *Molecules*, 26(15), 4611.

12. EFECTOS TERAPÉUTICOS DEL NOPAL

¹González Maldonado Ma. G. y ²Silos Vega H. X.

¹TecNM-Campus El Llano. Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales. Km 18, carr. Aguascalientes-San Luis Potosí, El Llano Ags., México. C.P. 20330.

²Estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias Química de la Universidad de Colima. Carretera Colima - Coquimatlán 9, 28400 Coquimatlán, Colima, México.

Correspondencia: gpemaldonado2016@gmail.com

GMNG,

ORCID:0009-0008-0737-2591,

Tema	Página
I. Resumen.	190
II. Introducción.	191
III. Usos curativos del nopal en el México prehispánico.	192
3.1 Lo que conocen las persona en la actualidad sobre el uso medicinal del nopal.	194
IV. Propiedades nutraceuticas del nopal.	195
4.1 Los frutos.	195
4.2 Cladodios.	196
4.3 Flores.	196
4.4 Usos del nopal en medicina tradicional en el mundo.	197
V. Propiedades profilácticas y terapéuticas del nopal.	198
5.1 Actividad antioxidante.	198
5.2 Propiedades antiinflamatoria y anti-trombogénica.	199
5.3 Características anticarcinogénicas y antiulcerogénicas.	200
5.4 Actividad inmunomoduladora.	202
5.5 Efecto hepatoprotector.	202
5.6 Protección de la membrana celular.	203
5.7 Protección del tracto gastrointestinal.	203
5.8 Disminución de la glucosa sanguínea y del colesterol.	204
5.9 Hipertrofia prostática benigna.	204
5.10 Efecto anti-osteoporosis.	205
5.11 Cicatrización de heridas.	205
5.12 Efecto antiviral.	207
5.13 Efecto antibacteriano.	208
5.14 Efecto neuroprotector.	208
5.15 Enfermedad renal.	209
VI. Literatura citada.	209

I. Resumen

Desde tiempos ancestrales en México se ha conocido que el nopal, además de ser un alimento de uso común en la dieta de los mexicanos por sus los beneficios nutritivos que aporta, ha tenido gran impacto debido a sus propiedades profilácticas y terapéuticas para coadyuvar en una gran variedad de padecimientos. Así, nos han llegado hasta la actualidad, año 2024, conocimientos sobre la

utilidad que tiene el cladodio tierno, el cladodio maduro, la flor, la tuna y la semilla del nopal para diversos trastornos. Por ejemplo, en la época prehispánica, se daba de beber los cladodios machacados y mezclados con agua a las mujeres en proceso de parto para que la criatura naciera con menor dificultad; se empleaba la raíz del nopal desecada y molida en la curación de heridas y fracturas; en el tratamiento de heridas se empleaba el cladodio molido y mezclado con miel y yema de huevo; los aztecas empleaban el mucílago como medida terapéutica en diarreas, úlceras estomacales, fiebre y labios agrietados; usaban las espinas para el tratamiento de heridas de la piel y los cladodios en cataplasma para aliviar inflamaciones. Ahora se conoce que el nopal y su fruto contienen sustancias promotoras de la salud, tales como vitamina A, E y C, flavonoides (quercetin, kaempferol y derivados de isorhamnetina), betalaínas, derivados de la clorofila, aminoácidos, aceites esenciales, fibras dietarias y calcio, asociadas a una gran capacidad antioxidante, actividad antibacteriana y antifúngica, antiinflamatoria, cicatrizante, antiviral, reductora de colesterol, anticancerígena, protectora del ADN, neuroprotectora, hepatoprotectora, hipoglucemiante, antiulcerogénica, antilipidémica y antiobesidad.

¡Con cuánta razón los Aztecas le han llamado al nopal “El árbol de la vida”!

II. Introducción

México es la cuna del nopal. Hace 20 mil años, aproximadamente, cuando los primeros pobladores llegaron a la cuenca de México y vivían como nómadas cazadores y recolectores encontraron varios géneros de cactus de los cuales se alimentaban. Este vegetal habría sido domesticado hace 9 mil años y junto con el maguey, el maíz y el frijol, fue el alimento principal de los grupos chichimecas. Ellos lo llamaron *nohpalli*, voz náhuatl que se transformó en nopal a la llegada de los españoles (Inglese *et al.*, 2018). El territorio mexicano se considera el centro de mayor diversidad de cactus del continente, pero también es centro de la diversidad de nopales. México cuenta con la mayor cantidad de especies silvestres; principalmente *Opuntia streptacantha*, *Opuntia hyptiacantha*, *Opuntia albicarpa*, *Opuntia megacantha* y *Opuntia ficus-indica*. Siendo esta última la especie más cultivada y domesticada debido a sus impactos nutricionales, medicinales, farmacéuticos y económicos. *Opuntia ficus-indica* se ha convertido en un cultivo de hortalizas tan importante como el maíz y el agave azul tequilero; su relevancia económica está aumentando significativamente en nuestro país y en otras partes del mundo, especialmente para mejorar la salud cuando se incluye el nopal y la tuna en la dieta. La producción mexicana anual puede alcanzar las 350,000 toneladas; por ello, nuestro país representa aproximadamente el 90% de la producción total a nivel mundial. Además, México es el principal productor de frutos de tuna, representando más del 45% de la producción mundial (Madrigal-Santillán, *et al.*, 2022). “*Opuntia ficus-indica* es un milagro de la naturaleza que nos ha sido otorgado para reducir el riesgo de muchas calamidades”. No solo se puede servir como alimento, sino que también imparte efectos benéficos para la salud que no solo reducen las posibilidades de enfermarse, sino que también ayudan a aliviar los efectos drásticos de la exposición a enfermedades. Actualmente podemos encontrar el nopal en Norte América, Venezuela, Bolivia, Sud-África, Argentina, Jordania, Israel, India, Italia, España, en el Norte de África y en los Estados Unidos. Se puede encontrar en áreas desérticas, áreas debajo del nivel del mar hasta en áreas de gran altitud como en las montañas de Perú. (Ramzan y Saeed, 2020). Se conoce que *Opuntia stricta* se encuentra ampliamente distribuida alrededor del mundo; es endémica de México, Ecuador, Estados Unidos, el Caribe, Colombia y Venezuela. *Opuntia stricta* var. *dillenii* se puede encontrar en las islas de clima más seco en el Caribe y en Louisiana y Georgia, en los Estados Unidos. También ha sido una planta introducida en España, el Sur de Australia, Sri Lanka, Yemen, Francia, Italia, Sudáfrica, Tanzania, Kenia, Namibia, Zambia, Zimbabwe y Etiopía (Kampamba *et al.*, 2022). Podría decirse que el Nopal es una planta con efectos preventivos y terapéuticos, desde México para el mundo.

III. Usos curativos del nopal en el México prehispánico

El Nopal (*Opuntia, spp*), también conocido como Tuna, Tunera, Chumbera, Higo de Indias, Tuna de Castilla o Nopal de Castilla, Higo de los cristianos, Tapia, Sabra, Mission cactus, Palma forrageira, Palma de gado (Inglese *et al.*, 2018), Yaaxpakan, Opúntia, Palma-De-Espinho, Palmatória (Kampamba *et al.*, 2022), Fruta de los pobres, El tesoro bajo las espinas, La planta del futuro, La planta que asusta, El árbol monstruo (Ramzan y Saeed, 2020), Corazón de Copil (debido a la leyenda Mexica acerca del origen del nopal), ya era conocido desde tiempos prehispánicos, por su uso como alimento y por sus propiedades medicinales (Vela, 2015). Fray Bernardino de Sahagún en la *Historia general de las cosas de Nueva España* describió: “el árbol que se llama tuna, que tiene las hojas grandes y gruesas y verdes y espinosas, este árbol echa flores en las mismas hojas. Unas dellas son blancas; otras, bermejas, otras, amarillas; otras, encarnadas” mencionando uno de los usos medicinales y su forma de preparación: “Hácese en este árbol fruta que se llaman tunas. Son muy buenas de comer, nacen en las mismas hojas. Las hojas de este árbol, descortezadas y molidas, darlas a beber con agua a la mujer que no puede parir o que se ladeó la criatura. Con esto pare bien. A la mujer que se le ladea la criatura de dentro padece dos o tres días gran pena antes que pare. Esto acontece por la mayor parte a las mujeres que no se abstienen del varón antes de parir. Este árbol en todas partes se hace” (Figura 1).



Figura 1. Llib. XI, cap. VII. La ilustración procede del *Códice Florentino*, lib. XI, f.170v. Digitalización: Raíces. (Vela, E., 2015).

De igual forma, Fray Bernardino de Sahagún ilustra y describe la forma en que se empleaba el nopal para el tratamiento de heridas y fracturas: “Las quebraduras de los huesos de los pies curarse han con los polvos de la raíz que se llama *acocotli*, y de la raíz de la tuna, y ponerse en la quebradura del pie, y envolverse y atarse con algún lienzo o paño, y después de puesto el palo se han de poner cuatro palitos o tablillas a la redonda de la quebradura, y atarse han fuertemente con algún cordelejo para que desta manera salga la sangraza, y también se sangrará de las venas que vienen a juntarse entre el dedo pulgar del pie y el otro, porque no se pudra la herida. Y los palillos o tablillas se han de tener atados por espacio de veinte días, y después deste tiempo se han de echar una bilma de ocutzote con polvos de la

raíz del maguey y con un poco de cal, y sintiendo alguna mejoría podrán tomar algunos baños” (Figura 2).

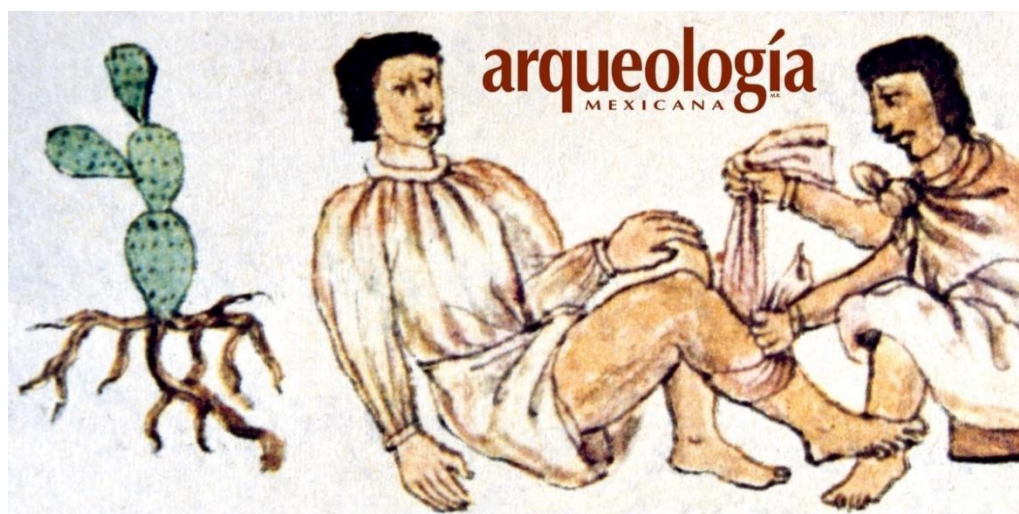


Figura 2. Fray Bernardino de Sahagún, *Historia general de las cosas de Nueva España*, lib. X, cap. párr. 6°. La ilustración procede del *Códice Florentino*, lib. X, f. 111v. Digitalización: Raíces. (Vela, 2015).

Mediante el *Códice Badiano* o *Libellus de Medicinalibus Indorum Herbis*, hemos podido conocer el uso del nopal en el tratamiento de quemaduras: “*Tlatocnochtli*. Quemaduras del cuerpo. Se alivian las quemaduras de nuestro cuerpo con jugo de *nohpalli*, *teamoxltli*, *amoxltli*, *tetzmitl*, *ehcapahltli*, *texiyotl* y *hutizquiltil*. Se ungen y se frotan con esa mezcla y además con miel y yema de huevo”. (Figura. 3). Si bien la glosa indica que se trata de un *tlatocnochtli*, nopal enterrado o sembrado (*tlatocltli-nochtli*), es posible que se refiera al nopal regio (*tlatocati-nochtli*). Esta planta ha sido identificada como *Opuntia tomentosa*. (Vela, 2015).

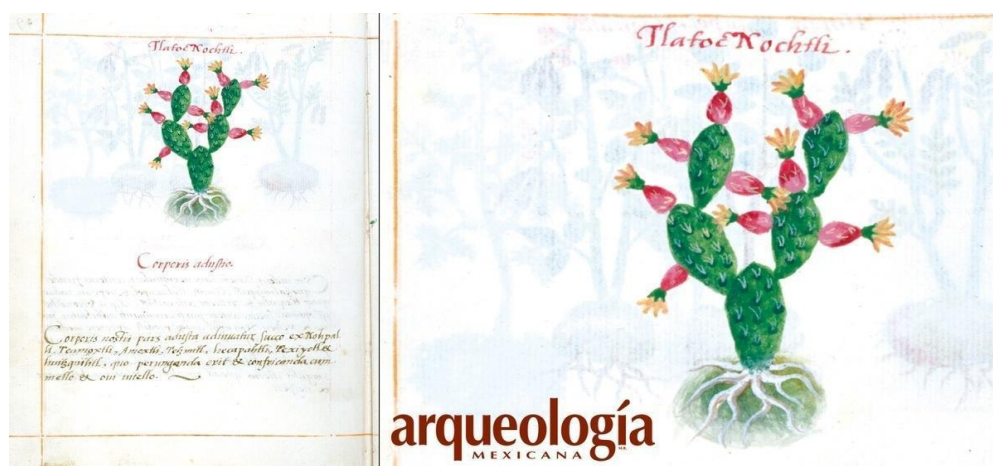


Figura.3. Representación de un nopal en la foja 49v del *Libellus de Medicinalibus Indorum Herbis* también conocido como *Códice Badiano*. (Vela, 2015).

La planta de nopal ha sido usada por civilizaciones antiguas por miles de años para tratar enfermedades y curar heridas. Los orígenes y la historia del nopal como medicina están por lo tanto ligados a las antiguas civilizaciones latinoamericanas. Por más de 12 000 años los nopales tiernos han sido consumidos por los mexicanos por sus cualidades nutritivas y propiedades curativas. Los cladodios, las frutas, semillas y flores han sido usados en la medicina tradicional en varios países a través de los siglos. Durante su larga peregrinación, que los llevó a diversos lugares de climas hostiles, los aztecas consideraban tenían un aliado natural en el nopal que consideraban “planta de la vida” debido a su resistencia y al hecho que incluso cuando parece completamente seco puede dar vida a nuevas plantas. Para el tratamiento de las fiebres bebían su jugo, para curar los labios agrietados aplicaban su mucus, utilizaban la pulpa para tratar la diarrea, las espinas para limpiar las infecciones, su fruto, la tuna, para eliminar el exceso de bilis, sus hojas en cataplasma para aliviar las inflamaciones y sus raíces para tratar las hernias, la irritación del hígado, las úlceras estomacales y la erisipela (Torres-Ponce *et al.*, 2015). El nopal se utilizaba para el tratamiento de padecimientos de la piel, para curar golpes, contusiones y quemaduras y como antiinflamatorio. (Vela, 2015). El mucílago (la baba) era la medicina para la parturienta y combinado con grasa de insecto, se usaba como crema para pies, labios y manos gastadas (Reyes- Agüero, 2011).

3.1 Lo que conocen las personas en la actualidad sobre el uso medicinal del nopal

El conocimiento sobre las propiedades curativas del nopal en México, se ha transmitido de manera oral de generación en generación. La forma de elaborar los preparados para las curaciones es variada: nopal crudo, asado, cocido, entero, picado, machacado, molido, en jugo, en jarabe, en cataplasma frío o caliente, etc. Se emplean diferentes partes de la planta y se realizan diferentes combinaciones de ellas: raíces, pencas, nopal maduro, nopal tierno, corteza, parte esponjosa (corazón de nopal), flores, tuna completa, cáscara de tuna, tuna verde, tuna madura, semillas, espinas o solamente la baba del nopal. Haciendo uso de las redes sociales, hice la siguiente pregunta en un grupo de personas jubiladas del ISSSTE a nivel nacional: ¿Qué sabe usted sobre el uso medicinal del nopal y de la tuna? Elegí este grupo porque está integrado por personas mayores a 50 años de edad, pensando que en alguna ocasión habrían tenido la oportunidad de entablar una plática sobre alguna propiedad curativa del nopal o incluso, de poner en práctica el uso del nopal en forma de algún remedio para aliviar cierto padecimiento. Las respuestas no se dejaron esperar, fueron numerosas, aunque la respuesta que presentó mayor frecuencia, fue aquella en la que se refiere al nopal por su propiedad antidiabética. Por ejemplo: “El nopal crudo, licuado junto con perejil, naranja y apio sirve para la diabetes”. “El nopal es bueno para bajar el azúcar en la sangre”. “El nopal y la tuna controlan la glucosa alta y sirven para mantenerse delgado, no hay problema si se disfrutan a diario”. “El nopal baja la glucosa, quita el estreñimiento y bajas de peso”. “El xoconostle con apio, nopal y limón es excelente para bajar el azúcar. Se toma en ayunas, todo licuado”. “El nopal licuado, con un poco de jugo de limón, es bueno para bajar el azúcar, hay que tomarlo con popote, porque se daña el esmalte de los dientes”. “Mi esposo lo usa en jugo, asado y guisado, para controlar su diabetes”. “Se recomienda para tratar la diabetes, el colesterol alto, la obesidad y la resaca”. Otras respuestas nos dan idea del uso del nopal en una variedad de trastornos o malestares. Por ejemplo: “El nopal combinado con naranja, apio, manzana y espinaca es bueno para el sistema inmunológico”. “Yo lo tomé en jugo, en ayunas y arrojé piedras de la vesícula y cuando me estaban preparando para operarme, al hacer el ultrasonido, ya no estaban las piedras; las arrojé gracias al bendito nopal”. “Acostumbro a tomar jugo de nopal con xoconostle todas las mañanas y no sufro de triglicéridos o colesterol”. “El jugo de nopal

crudo es riquísimo y sirve para la piel también ".El cocimiento de esta planta es diurético, aumenta la cantidad de orina y es útil en casos de inflamación de la vejiga o de la uretra, disminuye la sensación de ardor cuando hay cistitis y uretritis. Si el cocimiento se toma en dosis elevadas, favorece las evacuaciones intestinales, obrando como laxante y aún se dice que expulsa las lombrices intestinales". "Si se comen tunas de color rojo, la materia colorante pasa a la orina. Este colorante parece tener propiedades antisépticas". Con las respuestas obtenidas se puede observar que el conocimiento del enorme abanico de propiedades medicinales del nopal se ha ido diluyendo con el paso del tiempo, por lo que considero que es necesario retomar esa información, actualizar la lista de los efectos preventivos y terapéuticos del nopal y darle amplia difusión entre la población mexicana. Lo anterior sería una forma de continuar con los beneficios a la salud que ofrece esta planta que es nuestra por origen y tradición.

IV. Propiedades nutraceuticas del nopal

Con el término de Nutraceutico se conoce a los alimentos o los componentes nutricios de éstos, los cuales proveen beneficios para la salud de los seres humanos, ya sea para la prevención o tratamiento de ciertos padecimientos o malestares. Su clasificación puede hacerse por los nutrimentos que contienen como azúcares, grasas, vitaminas, aminoácidos y nutrimentos inorgánicos o bien, por sus componentes químicos como fibra dietética, isoflavonas, antioxidantes, carotenos, licopenos, ácidos grasos, compuestos fenólicos, fosfolípidos, fitoesteroles (Birute-Guzmán et al., 2009). Los frutos, cladodios, semillas, flores y raíces del nopal tienen un alto contenido de algunos constituyentes químicos que son promotores de la salud, mismos que están asociados a la prevención o tratamiento de diferentes padecimientos (Fig. 4) (Inglese et al., 2018).

4.1 Los frutos

Los frutos del nopal presentan alta actividad antioxidante, asociado a la presencia de vitamina C, flavonoides y betalaínas. Las betalaínas son pigmentos que contienen nitrógeno y pueden clasificarse en betacianinas rojas (betanina) y betaxantinas amarillas (indicaxantinas). Estos pigmentos no únicamente proveen color; sus propiedades antioxidantes son mayores que las del ácido ascórbico. Debido a su amplia variabilidad estructural asociada a la diversidad de colores, las betalaínas constituyen una fuente promisoría de colorantes naturales para usarse como colorantes funcionales. Comparada con el betabel rojo, la tuna no únicamente ofrece un rango más amplio de colores, sino también presenta ventajas tecnológicas; ausencia de geosmina (un sabor terroso indeseable), bajos niveles de nitratos y falta de contaminación por los microorganismos del suelo. Hay un efecto antioxidante debido a los principales flavonoides encontrados en el fruto del nopal (quercetin, kaempferol y derivados de isorhamnetina). La cáscara tiene un mayor contenido de fenoles que la pulpa. Consecuentemente, desde el punto de vista funcional, es más ventajoso el proceso de ambos, cáscara y pulpa. El jugo de la tuna puede ser usado para curar resacas, también es promovido como una bebida refrescante rica en vitamina C, flavonoides y antioxidantes, así como un agente antienviejecedor y antiinflamatorio. Es también considerado para promover la salud celular y desintoxicar el cuerpo (Inglese *et al.*, 2018), como antidiarreico y antiulcerogénico (Ramzan y Saeed, 2020). La tuna de *Opuntia stricta* contiene nutrientes tales como proteínas, calcio, nitrógeno, humedad, energía, grasas, cobre, hierro, magnesio, zinc, sodio, fósforo, niacina y vitaminas. En las semillas se han encontrado altas concentraciones de proteínas, aceites,

fibra y carotenoides. La pulpa tiene concentraciones altas de ácido ascórbico, fosfatos, calcio, hierro, sal, sacarosa, glucosa, y fructosa. La tuna de *Opuntia stricta* contiene betanina e isobetanina, más no betaxantinas. También se descubrió que los componentes principales de las cáscaras de la tuna de *Opuntia stricta* son: óxido de trans-linalool, óxido de cis-linalool y linalool (Kampamba *et al.*, 2022). Se ha reportado que la cáscara de la tuna de *Opuntia robusta* es una fuente potencial de pectina para diferentes aplicaciones. En esta especie se obtuvieron dos tipos de pectinas con diferente peso molecular. Las propiedades antioxidantes de las dos pectinas indicaron un contenido similar de polifenoles y buenas propiedades de emulsificación. Las propiedades reológicas indicaron que ambas pectinas eran fluidos diluyentes y con un comportamiento predominante de gel elástico. Se demostró que las pectinas obtenidas de *Opuntia robusta* son competitivas con aquellas obtenidas de otras fuentes (Mota *et al.*, 2020).

4.2 Cladodios

En los tallos del nopal, también conocidos como palas o pencas se han encontrado componentes funcionales tales como los derivados de la clorofila, aminoácidos y flavonoides. Se observó la presencia de cinco flavonoides principales (isoquercetina, isorhamnetina-3-O-glucósido, nicotiflorina, rutina y narcisina) en todas las variedades de nopal, siendo predominante la nicotiflorina. (Inglese *et al.*, 2018). La sabia del cladodio es remedio para la tos ferina, además, si se calienta el nopal y se coloca sobre el pecho, ayuda a disminuir la congestión, para tratar el edema y la indigestión (Ramzan y Saeed, 2020). También se reporta que los cladodios de *Opuntia stricta* contienen aceites esenciales, fibras dietarias, antioxidantes, carbohidratos, diferentes flavonoides, vitaminas, depuradores de radicales libres y fitoquímicos. Los cladodios de edad mediana de *Opuntia ficus-indica* contienen más saponinas totales, fitoesteroles y fibra no digestible que los cladodios más jóvenes o más viejos. Se ha encontrado que los cladodios de las especies de *Opuntia* son una buena fuente de fibras dietarias, las cuales están asociadas con la disminución de los niveles de glucosa sanguínea, al unirse a los lípidos de la dieta y aumentar su excreción. El contenido de calcio de los cladodios de *Opuntia* es mayor que el de las hortalizas, frutas y nueces. Los niveles de vitaminas A, E y C de los cladodios de *Opuntia stricta* por 100g de extracto seco, fueron de 711.2 mg, 231.4mg y 2.9mg, respectivamente. Los cladodios, debido a su composición química, tienen propiedades farmacológicas como antiinflamatorios, antioxidantes y antineoplásticos (Kampamba *et al.*, 2022).

4.3 Flores

Las inflorescencias del nopal acumulan betalaínas, así como compuestos fenólicos incoloros. *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia stricta* en la etapa 4 de floración presentaron actividades antibacterianas y antifúngicas. El contenido de fenoles varía de forma marcada con la etapa de floración y estos constituyentes activos muestran su máximo durante la etapa de postfloración (Inglese *et al.*, 2018). Son medicina eficaz contra las hemorroides, antidiarreicos y antiulcerogénicos (Ramzan y Saeed, 2020). En la Figura 4 se muestran las propiedades terapéuticas que se le atribuyen al nopal.



Figura 4. Propiedades medicinales más relevantes asociadas a los productos del nopal. (Tomada de Inglese *et al.*, 2018).

4.4 Usos del nopal en medicina tradicional en el mundo

En este apartado se dan algunos ejemplos sobre el uso medicinal del nopal, empleado como una planta de medicina tradicional en cada lugar mencionado. En el Sur del Sahara se emplea el nopal para curar las hemorroides, por su efecto antidiarréico, hipoglucemiante, antiinflamatorio y antiulcerogénico, como remedio para la tos ferina, como antiviral, para aliviar la congestión alcohólica, para el tratamiento de gastritis catarral, hiperlipidemia, edema, quemaduras, heridas y para tratar la obesidad. Stintzing y Carle en su revisión realizada en 2005 mencionaron que en Italia *Opuntia fuliginosa* and *Opuntia streptacantha* se ha empleado para el tratamiento de gastritis, fatiga, disnea y daño hepático seguido de abuso en el alcohol. Tradicionalmente se han aplicado emplastos calientes para tratar desórdenes reumáticos, eritemas e infecciones crónicas de la piel, además de que mejoran la digestión y favorecen el proceso de desintoxicación. Las personas sicilianas usan el nopal como cicatrizante; el nopal en su forma cruda y cocida para bajar el nivel de azúcar en sangre, para edema e indigestión, para el tratamiento de enfermedades pulmonares, por su acción diurética, para tratamiento de gastritis, úlceras gástricas, arteriosclerosis, diabetes y por su efecto protector de cartílagos. En la medicina tradicional China se practica la “moxibustión” que es un procedimiento en el cual el nopal es quemado y aplicado sobre la piel para curar irritaciones e infecciones de la piel. La tribu Lakota prepara un té de tuna que resulta útil en el parto. En Corea del Sur el nopal se ha utilizado para tratamiento de asma bronquial, diabetes, dolor abdominal, indigestión y quemaduras (Ramzan y Saeed, 2020). Recientemente se han obtenido efectos positivos de los cladodios en el tratamiento de la hiperglicemia, acidosis, y arterioesclerosis. En medicina veterinaria tradicional, se ha empleado *Opuntia ficus-indica* como una planta para uso en etnoveterinaria. *Opuntia stricta* es un miembro bien conocido de la familia de las cactáceas, es una planta relativamente desconocida en Zambia, donde se considera principalmente como una flor y

solo unas pocas personas locales la usan como medicina a base de hierbas, complementaria para controlar enfermedades crónicas como la diabetes mellitus (Kampamba *et al.*, 2022). El jugo de fruta madura de *Opuntia elatior* Mill, se ha utilizado por la población local de Gujarat (India) para tratar la anemia y la debilidad general (Sanyal *et al.*, 2016). La *Opuntia humifusa* se ha utilizado durante mucho tiempo en la medicina oriental coreana para tratar la diabetes, la inflamación y la artritis reumatoide (Sharma *et al.*, 2017).

V. Propiedades profilácticas y terapéuticas del nopal

Hoy en día los frutos y cladodios del nopal son el centro de atención de muchos estudios porque contienen compuestos bioactivos (fitoquímicos) conocidos por sus propiedades relacionadas con la salud. Hay una correlación positiva entre una dieta rica en nopal y un riesgo reducido de enfermedades asociadas al estrés oxidativo, tales como diabetes, cáncer, enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas, arterosclerosis, enfermedades inflamatorias, daño hepático, y enfermedades renales (Pourmajed *et al.*, 2021). *Opuntia ficus-indica* ha mostrado diversas acciones farmacológicas a través de su actividad antioxidante: protege las células contra el daño oxidativo, actúa como captador de radicales, reduce la peroxidación lipídica y aumenta los niveles de glutatión. Hasta el momento, no hay ningún informe sobre los efectos adversos/tóxicos en humanos (Osuna-Martínez *et al.*, 2014). Se ha informado que la mayoría de estas enfermedades tienen un origen inflamatorio de naturaleza crónica e implica la liberación de especies reactivas de oxígeno. Dichas especies reactivas de oxígeno también están involucradas en la expresión de marcadores inflamatorios, algunos de los cuales participan en la proliferación celular y metástasis y son mediadores de inmunidad (Adebayo *et al.*, 2021). Los principales compuestos bioactivos del nopal incluyen pigmentos (carotenoides, betalainas y betacianinas), vitaminas, flavonoides (isorhamnetina, kaempferol, quercetina) y compuestos fenólicos. En conjunto se consideran fitoquímicamente importantes y están asociados a la prevención y control de algunas enfermedades crónicas e infecciosas. sobre sus propiedades neuroprotectoras, antiinflamatorias, antiulcerosas, antimicrobianas y potencial antiviral y en el tratamiento de heridas en la piel. Algunos autores recomiendan una ingesta de nopal entre 10 a 17 g/persona/día de *Opuntia* y/o frutos de tuna para tener una vida saludable. Otros sugieren entre 100 y 500 g/día de cladodios para reducir significativamente las complicaciones de la diabetes mellitus. Existen productos a base de nopal en presentaciones comerciales de cápsulas, tabletas, polvos y jugos cuyas pautas de dosificación por vía oral se establecen en 250 mg/3 veces al día/cada 8 h. En general, las dosis oscilan entre 50mg/kg y 7g/kg (Madrigal-Santillán *et al.*, 2022).

En los siguientes apartados se describen algunas evidencias experimentales que se han realizado con diferentes fitoquímicos más importantes contenidos en el nopal, que nos pueden ayudar a entender su mecanismo de acción farmacológica y dar un sustento científico a los usos del nopal en medicina tradicional e identificar su potencial profiláctico y/o terapéutico para diferentes enfermedades.

5.1 Actividad antioxidante

El proceso de oxidación en el organismo humano es estimulado por varias enfermedades. Los polifenoles contenidos en *Opuntia ficus-indica* poseen actividad antioxidante, la cual está compartida entre flavonoides, estilbenos, ácidos fenólicos y lignina y suberina. Se inhibe el proceso de oxidación a través de la interacción de los flavonoides con los

carbohidratos, lípidos y proteínas. Los mecanismos responsables de llevar a cabo la actividad antioxidante se muestran en la Figura 5. Las betalainas también juegan un papel vital en las propiedades antioxidantes. Éstas son pigmentos presentes en las vacuolas en forma de ácido betalámico, el cual se condensa y se convierte en betacianinas, de color violeta, y betaxantinas, de color amarillo.

En *Opuntia ficus-indica* las betalainas están presentes en la pulpa y en la piel. En la revisión de Ramsan y Saeed en 2020, se menciona que en el estudio realizado por Jahia y Sáenz en 2011, concluyeron que los tocoferoles y los carotenoides no ejercen actividad antioxidante, sin embargo, los compuestos fenólicos, las betalainas y la vitamina C son los responsables de llevar a cabo dicha actividad. Estudios realizados en cuanto a la composición química de *Opuntia stricta* (Haw), una especie relativamente desconocida en Sudáfrica, mostraron que esta planta es rica en compuestos polifenólicos y tiene buena actividad antioxidante, así como actividades antiinflamatorias (Izuegbuna *et al.*, 2019).

Las raíces del nopal también tienen propiedades antioxidantes e inhibidoras de mediadores inflamatorios, como lo muestran los estudios realizados con *Opuntia humifusa*, por lo que se propone usar la raíz con un enfoque terapéutico para diversas enfermedades inflamatorias (Kim *et al.*, 2014). Recientemente se ha empleado *Opuntia ficus-indica* como un biomaterial adecuado para la síntesis de nanopartículas que pueden ser utilizadas como agente antioxidante. *Opuntia ficus-indica* es una buena fuente de compuestos fenólicos y flavonoides.

Son los fitoquímicos más importantes, responsables de la capacidad antioxidante. Para este estudio se sintetizaron nanopartículas usando un extracto del fruto, ya que se ha reportado que tiene mayor cantidad de compuestos fenólicos. Los grupos fenólicos facilitan la conversión de nitrato de plata a nanopartículas de plata, debido a su capacidad donadora de electrones. Estas fascinantes bioactividades exhibidas por las nanopartículas sintetizadas, establecieron su utilidad en la producción de antioxidantes OFI-AgNPs (Nanopartículas de *Opuntia ficus-indica* con plata), OFI-AuNPs (Nanopartículas de *Opuntia ficus-indica* con oro) y OFI-Ag-AuNPs (Nanopartículas de *Opuntia ficus-indica* con aleación bimetálica de plata y oro) para sus aplicaciones biomédicas (Adebayo *et al.*, 2021).

5.2 Propiedades anti-inflamatoria y anti-trombogénica

Los flavonoides que contiene *Opuntia ficus-indica* ayudan en la prevención de la inflamación, ya que inhiben el metabolismo del ácido araquidónico, resultando en propiedades antiinflamatorias y antitrombogénicas (Figura 6). Ramsan y Saeed en 2020, mencionaron que Antunes *et al.* en 2015, realizaron un estudio empleando extracción alcalina y purificación a través de cromatografía de *Opuntia ficus-indica*. Los resultados obtenidos indicaron que dicho extracto afectó significativamente la inhibición de la expresión del gen COX-2 (ciclooxigenasa-2), disminuyendo la secreción de citocinas y óxido nítrico. Los frutos de *Opuntia* tienen propiedades antiinflamatorias que son dosis dependientes (Kampamba *et al.*, 2022). En ensayos realizados con el extracto de *Opuntia humifusa* se obtuvo que disminuyó significativamente la concentración de azul de Evans en la prueba de permeabilidad vascular inducida por ácido acético, revelando su fuerte efecto antiinflamatorio. Se sugiere que este extracto metanólico se puede utilizar para desarrollar un fármaco terapéutico contra enfermedades relacionadas con el dolor y la inflamación (Sharma *et al.*, 2017).

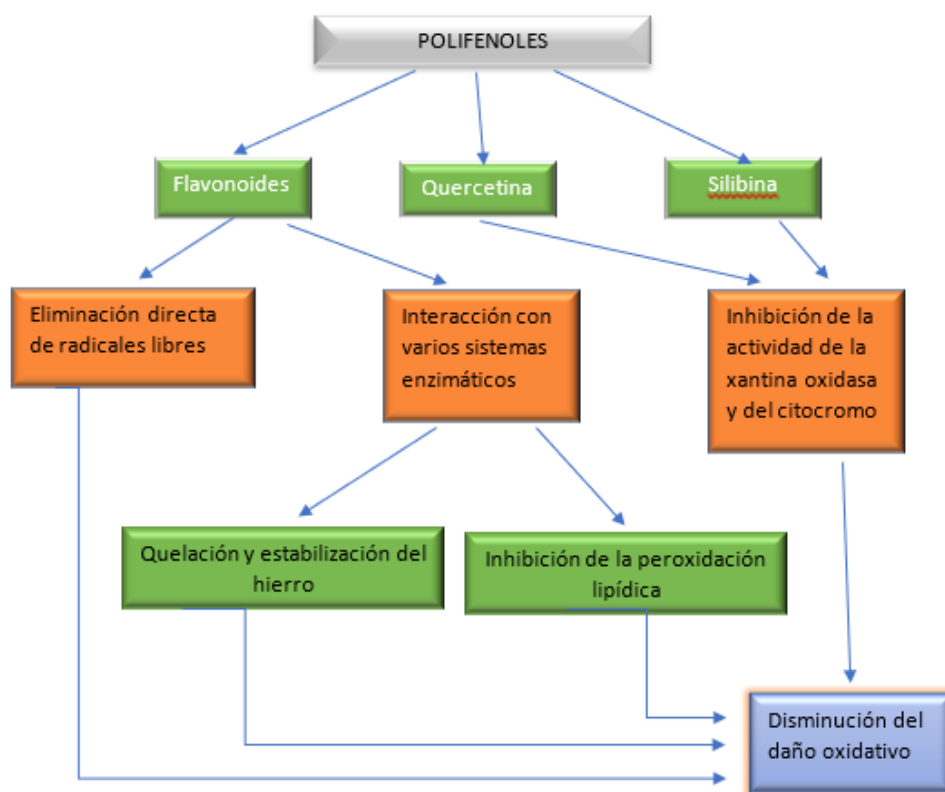


Figura 5. Actividad antioxidante de los polifenoles contenidos en *Opuntia ficus-indica*. Traducido de Ramzan y Saeed, 2020.

5.3 Características anticarcinogénicas y antiulcerogénicas

Opuntia ficus-indica posee actividad quimio-protectora. Se encontró que el extracto de esta planta es efectivo en la inhibición de células cancerosas de *cérvix* uterino, vejiga y ovario y estimulando la apoptosis celular. El extracto de *Opuntia ficus-indica*, con un alto contenido de betaninas, también es benéfico en términos de inducción de la apoptosis celular. En la leucemia mieloide, las betalainas ejercen acción inhibitoria del crecimiento celular (Figura 7). Además, los antioxidantes presentes en *Opuntia ficus-indica* tienen la capacidad de prevenir y restaurar daños en la mucosa gástrica tales como gastritis, úlceras y cáncer (Ramsan y Saeed, 2020). Se encontró que el extracto alcaloide de *Opuntia polyacantha* tiene la capacidad de reducir la viabilidad de las células de cáncer de mama por condensación nuclear, permeabilidad de la membrana celular, alteración del potencial de membrana mitocondrial (MMP), fragmentación y liberación de citocromo c de la mitocondria al citosol. Por lo tanto, *Opuntia polyacantha* es un inhibidor potencial de MCF7 en comparación con la doxorubicina como control positivo. *Opuntia polyacantha* podría tener un valor terapéutico en el tratamiento del cáncer de mama digno de mayor atención (Abtisam *et al.*, 2020).

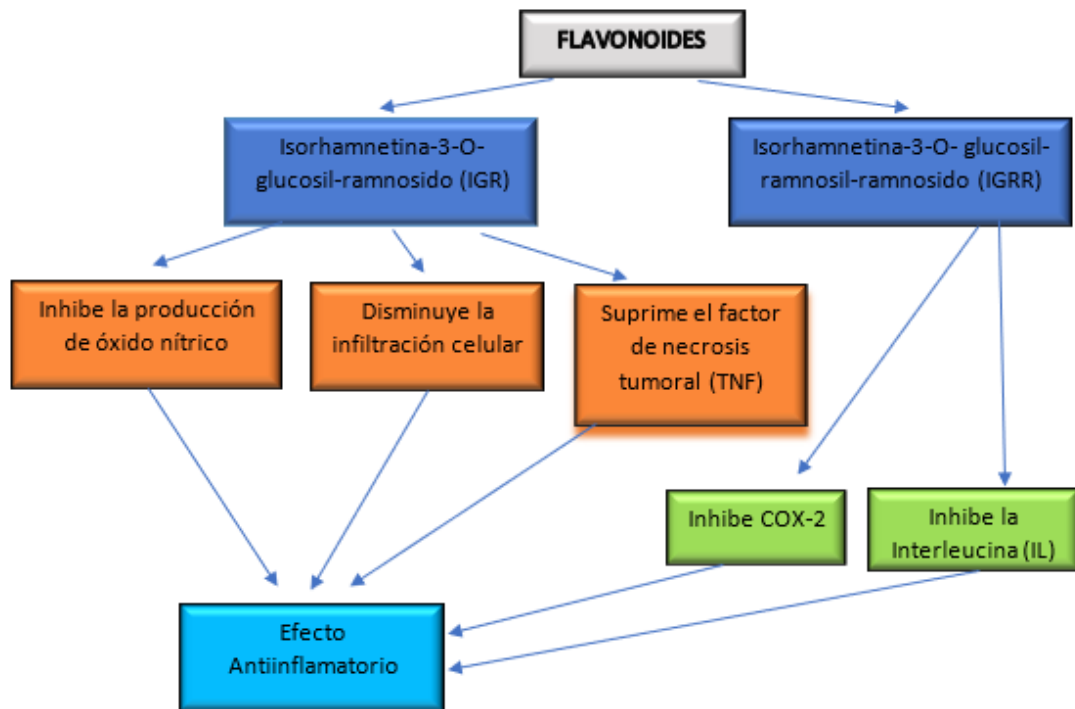


Figura 6. Mecanismo antiinflamatorio de los flavonoides contenidos en *Opuntia ficus-indica*. COX-2: expresión del gen de la enzima ciclo-oxigenasa. Traducido de Ramzan y Saeed,2020.

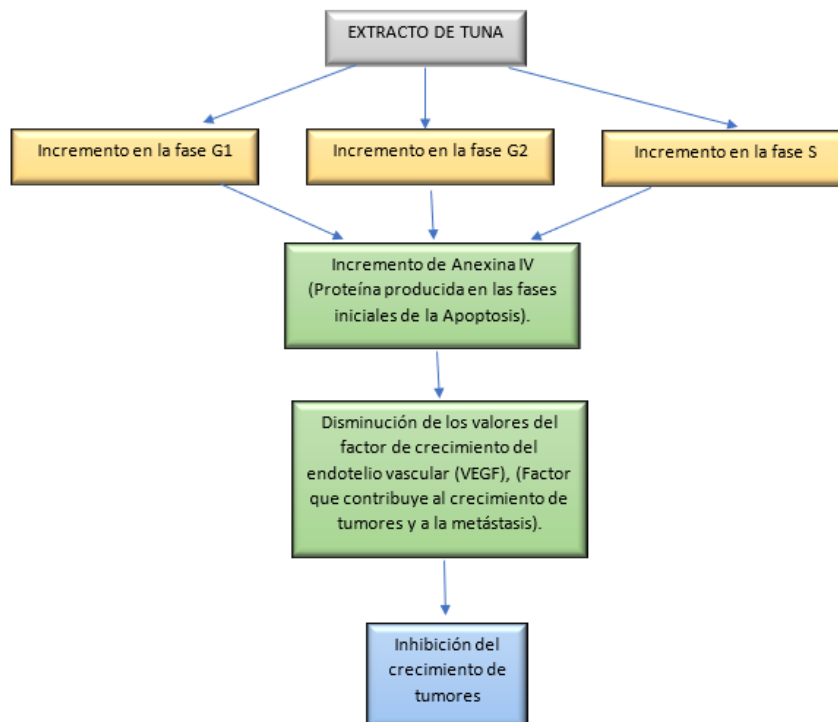


Figura 7. Inhibición del crecimiento de células cancerosas e inducción de la apoptosis por el extracto de tuna. Traducido de Ramsan y Saeed, 2020.

5.4 Actividad inmunomoduladora

El sistema de defensa del cuerpo humano tiene la capacidad de combatir los factores causantes de la enfermedad, sin embargo hay causas como la enfermedad autoinmune en las que el sistema inmune comienza a actuar contra los órganos y tejidos corporales propios, por ejemplo en la psoriasis, dermatitis atópica, diabetes tipo I y artritis reumatoide. Los estudios en esta área han mostrado que *Opuntia ficus-indica* tiene efectos inmunomoduladores, los cuales se han logrado al minimizar la multiplicación de las células T Jurkat (Ramsan y Saeed, 2020). En otro estudio, se extrajeron polisacáridos de los cladodios de *O. polyacantha*. Se empleó cromatografía de exclusión por tamaño para fraccionar los polisacáridos crudos en cuatro fracciones de polisacáridos, designadas como CI a C-IV, cuyo promedio de tamaño se estimó en 733, 550, 310 y 168 kDa, respectivamente. El análisis de la composición de los azúcares reveló que los polisacáridos de *Opuntia* consistían principalmente en galactosa, ácido galacturónico, xilosa, arabinosa y ramnosa. El análisis de los efectos de los polisacáridos de *Opuntia* sobre los macrófagos humanos y murinos demostró que las cuatro fracciones tenían una potente actividad inmunomoduladora, lo cual induce la producción de especies reactivas de oxígeno, óxido nítrico, factor de necrosis tumoral α e interleucina 6. Además, la modulación de la función de los macrófagos por parte de los polisacáridos de *Opuntia* estuvo mediada, al menos en parte, por la activación del factor nuclear κ B. Estos resultados proporcionan una base molecular para explicar una parte de las propiedades terapéuticas beneficiosas de los extractos de *O. polyacantha* y apoyar el concepto de usar polisacáridos de *Opuntia* como adyuvante inmunoterapéutico (Schepetkin *et al.*, 2008).

5.5 Efecto hepatoprotector

El hígado es un órgano fundamental para el cuerpo humano, su papel principal es la desintoxicación, secreción de bilis, metabolismo de las proteínas y las grasas y el almacén de vitaminas y carbohidratos. *Opuntia ficus-indica* ha demostrado ser efectiva en la protección y conservación de la funcionalidad del hígado. Se ha obtenido que el jugo de tuna de *Opuntia ficus-indica* protege contra la hepatotoxicidad producida por el tetracloruro de carbono, eliminando el daño en 72 horas. La protección hepática es debida al incremento en los valores de aspartato amino transferasa y alanin amino transferasa (Ramsan y Saeed, 2020). Así mismo, se ha analizado el valor terapéutico de los extractos de frutos de *Opuntia robusta* y *Opuntia streptacantha* contra el daño hepático agudo inducido por paracetamol, tanto en pruebas *in vivo* como *in vitro*, mediante determinaciones bioquímicas, moleculares e histológicas. Se identificó que los principales biocomponentes de los extractos son las betacianinas, siendo la betanina la de mayor concentración. Así, las betacianinas y la betanina de los frutos de *Opuntia robusta* y *Opuntia streptacantha* son compuestos nutraceuticos prometedores contra el daño hepático oxidativo, además dichos componentes hepatoprotectores pueden usarse como nutraceuticos para prevenir la insuficiencia hepática aguda. Se observó que en hepatocitos cultivados, los extractos de *Opuntia* redujeron significativamente la pérdida de Lactato deshidrogenasa (LDH) y disminuyeron la necrosis celular, tanto de manera profiláctica como terapéutica. Ambos extractos parecían ser superiores a la N-acetil-L-cisteína (NAC), que es la terapia actual para la insuficiencia hepática aguda inducida por paracetamol. La terapia con dicho fármaco no siempre es eficaz, ya que a menudo se necesita un trasplante de hígado. Se concluyó que los extractos de *Opuntia* son

hepatoprotectores y pueden usarse como nutraceuticos para prevenir la insuficiencia hepática aguda (González-Ponce *et al.*, 2016). En el presente año se ha reportado que el fruto de *Opuntia robusta*, debido a su capacidad antioxidante, tiene un efecto protector sobre la fibrosis hepática inducida con tioacetamida en ratas Wistar. Se observó un aumento ($p < 0,05$) de aminotransferasas y una disminución ($p < 0,05$) de GSH hepático. Se encontró que la tuna contenía $436,5 \pm 57$ mg de equivalentes de Betacianinas/L., 793 mg de equivalentes de catequina (CAE)/100 g para flavonoides, 1118 mg de equivalentes de ácido gálico (GAE)/100 g para fenoles totales, 141,14 mg/100 g para vitamina C y 429,9 μ g/100 g de vitamina E. Se concluyó que *Opuntia robusta* contiene componentes bioactivos con capacidad antioxidante, que pueden reducir el daño hepático fibrótico. (Pulido-Hornedo *et al.*, 2022).

5.6 Protección de la membrana celular

Los cladodios de *Opuntia ficus-indica* se han caracterizado por tener tres carotenoides, incluyendo β -caroteno, luteína y acriptoxantina. El mayor contenido de carotenoides fue detectado en variedades de color naranja, mientras que en el caso de cladodios jóvenes los valores oscilaron entre 0.47 y 0.077 mg/100 g. En los frutos, la concentración varía entre 1.77 mg/100 g y 2.65 mg/100 g. La cáscara de la tuna contiene 2.97 mg/100 g de carotenoides. Los carotenoides y las xantofilas como la zeaxantina, criptoxantina, β -caroteno, licopeno y α -caroteno tienen la capacidad de extinguir el oxígeno singlete (1O_2), mecanismo principal de acción de los carotenoides. También se observó que los carotenos de 9 a más enlaces conjugados dobles son eficientes extintores del oxígeno singlete, mientras que los menos de siete son poco eficientes. En el proceso de extinción del oxígeno singlete, los 15-15'-cis-carotenoides son isomerizados a todo trans. Varios sistemas biológicos tienen la capacidad de generar oxígeno singlete. En todos estos sistemas se ha observado que el oxígeno singlete generado, puede ser extinto por el β -caroteno. Las evidencias presentadas sugieren que los carotenoides, no solamente protegen contra efectos de oxígeno singlete, sino también contra otros radicales que tienen la capacidad de catalizar la oxidación de los ácidos grasos poliinsaturados, presentes en las membranas biológicas (González *et al.*, 1999). Los cactus se han empleado en medicina tradicional por su propiedad cicatrizante. *Opuntia ficus-indica* tiene polímeros de carbohidratos tales como la mezcla de mucílago y pectina. Las investigaciones han demostrado que los cladodios, particularmente los polisacáridos pécticos presentan el fenómeno de criptoprotección, el cual consiste en romper la célula epitelial, incrementando la producción de moco y por lo tanto el número de células secretoras. La cicatrización de las úlceras se produce mediante la regeneración o la migración de células, lo que provoca el engrosamiento de la membrana mucosa (Ramsan y Saeed, 2020).

5.7 Protección del tracto gastrointestinal

Los cladodios de cactus son considerados como una fuente de fibra para consumo humano. En base seca contiene 43% de fibra, incluyendo 28.5 de fibra soluble. Las fibras solubles ofrecen un potencial de beneficios a la salud, ya que estabilizan el tránsito intestinal. Las fibras insolubles como la celulosa, hemicelulosa y lignina son benéficas para la microflora intestinal, retención de agua, absorción de ácidos biliares e intercambio iónico. El consumo de alimentos altos en azúcares y grasas, incrementa el riesgo de adquirir condiciones de obesidad, disbiosis intestinal, inflamación y alteración de la barrera intestinal, debido al desequilibrio en el balance de la microflora intestinal. El nopal es rico como fuente de fibra

dietaria, vitamina C y polifenoles, los cuales son efectivos en la reducción de la obesidad, debida al equilibrio de la biomasa microbiana y la prevención de la endotoxemia metabólica (Ramsan y Saeed, 2020). Se encontró que el aceite de semilla de tuna de *Opuntia ficus-indica* extraído mediante prensado en frío exhibió potentes actividades antioxidantes, profilácticos y terapéuticos contra la úlcera gástrica aguda inducida por etanol absoluto. Ésto se debe a su riqueza en biocompuestos benéficos que actúan de forma sinérgica y complementaria para garantizar la gastroprotección y la cicatrización de las úlceras de la mucosa gástrica (Khemiri y Bitri, 2019).

5.8 Disminución de la glucosa sanguínea y del colesterol

Los cladodios de *Opuntia ficus-indica* contienen fibras solubles, gomas, pectina, mucílago y hemicelulosa que pueden favorecer la disminución del nivel de colesterol y el índice glicémico en humanos. Los polisacáridos, alcaloides, neobetanina, indicaxantina y flavonoides extraídos de cladodios producen un efecto especial antidiabético y antiglicémico. El desbalance redox es uno de los factores principales de la inducción genética de la diabetes. El aceite de la semilla de *Opuntia ficus-indica* tiene una alta cantidad de componentes poliinsaturados y antioxidantes que son útiles contra la diabetes mellitus, pues incrementan la tasa de sobrevivencia en un 78%. La tuna es un fruto con muchos fitoesteroles, betalainas, ácidos fenólicos y flavonoides. Especialmente la cáscara tiene muchos compuestos bioactivos que se pueden extraer y emplear como ingredientes funcionales. La cáscara de la tuna contiene alrededor de 65.65 de fitoesteroles tales como el sitoesterol (76.6%), campesterol (19.5%) y estigmasterol (3.9%), los cuales muestran un fuerte efecto hipocolesterolémico. También la cáscara de tuna posee el más alto contenido fenólico que puede producir un efecto sinérgico (Ramsan y Saeed, 2020). Se ha reportado que el fruto ácido del nopal, el xoconostle, el cual contiene compuestos bioactivos como fenoles y flavonoides, presenta actividad inhibitoria de las enzimas α -amilasa y α -glucosidasa, mismas que intervienen en la absorción de los carbohidratos en el tracto gastrointestinal (Kampamba *et al.*, 2022). Se han realizado compilaciones de trabajos realizados in vivo empleando ratas y conejos, que demuestran el efecto hipoglucemiante del nopal; algunos de estos trabajos incluso han demostrado el mecanismo de acción de diferentes especies de *Opuntia*. En seguida se muestra la compilación realizada por Kampamba *et al.*, en 2022. (Cuadro 1).

5.9 Hipertrofia prostática benigna

La próstata forma parte de los órganos reproductores de los machos mamíferos que contribuye a las secreciones. Ella rodea la vejiga y la parte proximal de la uretra. Comúnmente los músculos glandulares se alargan y presionan la uretra, ocasionando dificultad para la micción. Se cree que *Opuntia ficus-indica* cura estas complicaciones, especialmente la cocción elaborada con las flores. En el norte de África, las flores de *Opuntia*, combinadas con semillas de cebada y pelo de elote, se emplean para tratar la obstrucción urinaria. Durante un estudio con un producto en cápsulas de 250mg, Palevitch, los pacientes mostraron alivio de los síntomas de obstrucción urinaria. Las flores de *Opuntia ficus-indica* también son efectivas en la cura de la hipertrofia prostática benigna (Ramsan y Saeed, 2020).

5.10 Efecto anti-osteoporosis

Las fuentes de cadmio pueden ser la alimentación o el cigarro. Se evaluaron los efectos protectores de *Opuntia ficus-indica* contra la osteoporosis inducida por cloruro de cadmio en ratas Wistar hembra. La toxicidad ósea se estimó examinando la longitud y el peso femorales, los niveles de calcio, fósforo, vitamina D3 y fosfatasa alcalina (ALP), el estado oxidativo y los aspectos del ADN en el tejido del fémur. Los resultados mostraron que el cadmio podría inducir hipocalcemia, hipofosfatemia, deficiencia de vitamina D, aumento del nivel de ALP y disminución del peso y la longitud del fémur. Además, un estrés oxidativo evidenciado por pérdidas estadísticamente significativas en las actividades de catalasa (CAT), superóxido-dismutasa (SOD), actividades de glutatión-peroxidasa (GPX) y un aumento en el nivel de peroxidación de lípidos en el tejido óseo del grupo tratado con cadmio, en comparación con el grupo de control. El análisis histológico en tejido óseo reveló alteraciones morfológicas con áreas de reabsorción y pérdida de la arquitectura normal del hueso de la diáfisis del fémur, así como fragmentación del ADN. La administración de extracto de cactus atenuó el daño óseo inducido por cadmio. El efecto protector de la planta se puede atribuir a sus propiedades antioxidantes y a la existencia de ácidos fenólicos y flavonoides, como se destaca en el análisis basado en HPLC. Estos indican que el extracto de *Opuntia ficus-indica* puede utilizarse como una nueva opción en el campo nutracéutico (Taleb *et al.*, 2022).

Los autores anteriores mencionan otro experimento en el cual se les dio un complemento alimenticio a un grupo de 160 pacientes con dislipemia, consistente en 100g de *Opuntia*, durante un mes. Dicho grupo bajó considerablemente sus niveles de colesterol y triglicéridos sanguíneos. Se encontró que el jugo de tuna también produjo efectos hipocolesterolémicos y antiaterogénicos.

5.11 Cicatrización de heridas

Tradicionalmente, los cladodios de *Opuntia ficus-indica* se han utilizado para promover la curación de heridas a través de la formación de una cicatriz. Un ungüento preparado con cladodios liofilizados en un 15% produjo más tejido organizado de reconstrucción, fibroblastos y fibras que se organizarían apropiadamente en la dermis, así como la recuperación de los bulbos pilíferos en 5 días. Para la curación de heridas es necesario mantener el área bien hidratada. Así, el aceite de *Opuntia ficus-indica* estimula el proceso de generación de cicatriz, promoviendo el desarrollo de epitelio sobre la granulación muscular y también evita que la herida se deshidrate (Ramsan y Saeed, 2020). En el caso de *Opuntia* spp. y sus extractos, existen diversas evidencias de su uso en la medicina tradicional para el tratamiento de quemaduras, afecciones de la piel y cicatrización de heridas. El primer estudio en este campo de investigación comparó la actividad cicatrizante de una crema base que contenía cladodios liofilizados de *Opuntia ficus-indica* al 15%, frente a una pomada comercial, sobre heridas producidas en el lomo de ratas. Después de 5 días de tratamiento, el proceso de epitelización fue evidente y completo, lo que sugiere que los cladodios aceleran la proliferación y migración de queratinocitos en el proceso de cicatrización. El resultado anterior se confirmó cuando dos extractos de polisacáridos liofilizados obtenidos de *Opuntia ficus-indica* se aplicaron tópicamente durante 6 días y se observó que inducen un efecto benéfico: aceleran las fases de reepitelización-remodelación y favorecen las interacciones célula-matriz en las heridas de la piel de ratas. Se considera que las propiedades cicatrizantes de los cladodios de *Opuntia ficus-indica* pueden involucrar componentes polisacáridos de alto peso molecular (como el polímero lineal de

galactano y el xiloarabinano altamente ramificado) así como componentes de bajo peso molecular [ácido láctico, D-manitol, piscídico,

Cuadro 1. Mecanismo de acción de algunas especies de *Opuntia*

Autores	Evidencia	Mecanismo de acción
Kunyanga <i>et al.</i> , 2014	Extracto acuoso de cladodios de <i>Opuntia stricta</i> (1 mg/kg). Redujo los niveles de glucosa sanguínea <i>in vivo</i> .	**
Manzano <i>et al.</i> , 2017	Los cladodios de <i>Opuntia ficus indica</i> redujeron los niveles posprandiales de glicemia en ratas Wistar.	**
Hwang <i>et al.</i> , 2017	<i>Opuntia ficus-indica</i> mostró actividad antidiabética en ratas diabéticas inducidas con dosis bajas de estreptozotocina, alimentadas con una dieta alta en grasa.	Inhibición de la enzima α -Glucosidasa
Abdallah, 2008	El jugo de la fruta de <i>Opuntia dillenii</i> redujo los niveles de glucosa en ratas diabéticas inducidas con estreptozotocina,	La proliferación de islotes de células de Langerhans pudo haber explicado la actividad hipoglicémica debida a la actividad antioxidante.
Patel <i>et al.</i> , 2017	El jugo de la fruta de <i>Opuntia elatior</i> redujo los niveles de glucosa sanguínea en ratas albinas con diabetes inducida.	No realizado
Leem <i>et al.</i> , 2016	<i>Opuntia ficus-indica</i> var. <i>saboten</i> redujo significativamente los niveles de glucosa sanguínea en ratas.	La inhibición en la absorción de la glucosa en el intestino y el aumento de la captación de glucosa de las células musculares sensibles a la insulina a través de la vía de señalización AMPK/p38 MAPK
Hassan <i>et al.</i> , 2011	El jugo de fruta de <i>Opuntia ficus-indica</i> posee efecto hipoglicémico en ratas diabéticas inducidas con aloxano.	**
Mokua <i>et al.</i> , 2016	Los extractos de cladodios de nopal bajaron los niveles de glucosa sanguínea en ratas diabéticas inducidas con aloxano.	**
Nunez-Lopez <i>et al.</i> , 2013	Las harinas de cladodios medianos y pequeños de <i>Opuntia ficus-indica</i> disminuyeron la glucosa posprandial en ratas diabéticas inducidas con estreptozotocina.	**
Bouhrim <i>et al.</i> , 2019	El aceite de semillas de <i>Opuntia dillenii</i> redujeron los niveles de azúcar sanguínea en ratas diabéticas inducidas con estreptozotocina.	**
Halmi <i>et al.</i> , 2012	El extracto acuoso de los cladodios de <i>Opuntia ficus-indica</i> redujeron los niveles de azúcar sanguínea en conejos albinos con diabetes inducida.	**

**No investigado. (Traducido de Kampamba *et al.*, 2022)

eucomico y 2- ácido hidroxí-4-(4'-hidroxifenil)-butanoico]. Estos extractos podrían acelerar la regeneración celular en una monocapa de queratinocitos, lo que sugiere que los componentes de *Opuntia ficus-indica* exhiben altas propiedades antiinflamatorias y cicatrizantes. Asimismo, los polisacáridos extraídos de *Opuntia ficus-indica* estimulan la proliferación de fibroblastos y queratinocitos. Entre los agentes protectores presentes en los extractos de *Opuntia*, los componentes del glucósido de isorhamnetina (como el diglucósido de isorhamnetina-glucosil-ramnósido) podrían inhibir la producción de ciclooxigenasa-2, TNF- α e Interleucina-6 y la inducción de óxido nítrico provocada por LPS. No solo *Opuntia ficus-indica* ha mostrado efectos benéficos, los extractos de *Opuntia humifusa* regulan la producción de ácido hialurónico, aumentando la expresión de HA sintasa en los queratinocitos expuestos al tratamiento UV-B. El tratamiento con estos extractos podría disminuir la expresión aumentada de hialuronidasa UV-B. El mismo efecto protector sobre HA se ha observado en ratones sin pelo SKH-1 expuestos a UV-B, lo que indica que los extractos de *Opuntia humifusa* tienen una gran capacidad para el cuidado de la piel (Madrigal-Santillán *et al.*, 2022).

5.12 Acción antiviral

A pesar del increíble progreso de la medicina humana, las Infecciones Virales (VI) continúan siendo responsables de diversas enfermedades crónicas y agudas. Enfermedades como el Síndrome de Inmunodeficiencia Adquirida (SIDA), la hepatitis y los síndromes respiratorios, especialmente el causado por el virus del síndrome respiratorio agudo severo tipo 2 (SARS-CoV-2), se asocian con altas tasas de morbilidad y mortalidad (Madrigal-Santillán, *et al.*, 2022). Se realizó un estudio en el cual a concentraciones de 25 g/ml and 20 g/mL de extracto de flores de *Opuntia dillenii* se mostró una potente actividad antiviral contra Herpes simplex 1 y vaccinia. En otra investigación, se empleó la planta de *Opuntia streptacantha* para detener la replicación intracelular de este virus e inactivar los virus extracelulares. También se obtuvo inhibición de la replicación de los virus ADN y ARN: virus del herpes equino, el virus de la pseudorrabia, virus de la influenza, virus de la enfermedad sincitial respiratoria, HIV1, y virus tipo 2 de Herpes simplex (Kampamba *et al.*, 2022). A propósito de la pandemia que nos aqueja, hay una urgente necesidad de tratamientos terapéuticos para la Enfermedad Coronavirus 19 (COVID-19), causada por el Síndrome Respiratorio Agudo Severo (SARS)-Coronavirus (CoV)-2, justifica la gran atención que se está prestando actualmente no solo a los medicamentos antivirales reutilizados, sino también a productos naturales y medicamentos a base de hierbas. En este contexto, la utilidad anti-COVID-19 de, es decir, la principal proteasa del SARS-CoV-2, que es una de las proteínas dianas de estrategias terapéuticas para la COVID-19 más investigadas. Mediante el uso de dos programas de acoplamiento molecular basados en la web (1-Click Mcule y COVID-19 Docking Server), encontramos, para varios flavonoles y glucósidos de flavonol aislados de *Opuntia ficus-indica*, buenas afinidades de unión para M pro y, en particular, unión se predijeron energías inferiores a -7.0 kcal/mol para astragalina, isorhamnetina, isorhamnetina 3-O-glucósido, ácido 3-O-cafeoilquínico y quercetina 5,4'-dimetil éter. El compuesto quiral astragalina mostró en los estudios *in silico* (Término empleado para caracterizar simulaciones de experimentos biológicos llevadas a cabo enteramente en un computador) la mayor afinidad por M pro (-8.7 kcal/mol) y además un bajo perfil de toxicidad, emergiendo por tanto, como un interesante candidato a inhibidor de proteasas para estrategias anti-COVID-19 (Viciomini *et al.*, 2021). Estudios demuestran que el uso de herramientas *in silico* es un método valioso para realizar experimentos virtuales y descubrir nuevos agentes terapéuticos (Madrigal-Santillán, *et al.*, 2022).

5.13 Efecto antibacteriano

Se realizó un estudio empleando extractos de cladodios de *Opuntia dellini* para revisar su potencial bactericida contra *Escherichia coli*, *Streptococcus pneumonia*, *Salmonella typhi*, *Klebsiella pneumonia* y *Proteus vulgaris*. Las pruebas de sensibilidad antibacteriana (diámetros de la zona de inhibición (mm) para los extractos (a 50 mg), se contrastaron con dosis antibacterianas estándar de Ampicilina a 1 mg/ml contra los patógenos clínicos. Los resultados demostraron que los extractos de *Opuntia dellini* tienen actividad antibacteriana que podría ser útil para prevenir el progreso de diversas enfermedades en humanos y en animales. Se puede utilizar como medicina alternativa, reforzando la importancia de la etnobotánica como una fuente potencial de sustancias bioactivas. Esta planta puede ser una fuente de utilidad para obtener nuevos agentes antimicrobianos, incluso para microorganismos resistentes a los antibióticos, ya que pueden asociarse con antibióticos. Los extractos de esta planta tuvieron actividad contra bacterias resistentes a antibióticos a muy bajas concentraciones, lo cual minimiza la posibilidad de generar efectos tóxicos (Sivaraj *et al.*, 2011). Kampamba y colaboradores refieren un estudio fascinante realizado por Moosazadeh y colaboradores en el que encuentran un efecto antibacteriano del aceite de *Opuntia stricta* en cepas standard de *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Candida albicans*, y *Bacillus licheniformis*. La presencia de timol, identificado como componente principal, fue relacionada con la actividad antibacteriana. También mencionan que los cladodios de *Opuntia ficus-indica* inhibieron el crecimiento de bacterias gram positivas y la generación de biopelículas de *Estafilococos aureus*. Por otra parte, el extracto de *Opuntia dillenii* y sus nanopartículas sintetizadas con oro y plata, mostraron una clara zona de inhibición contra las bacterias *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumonia* y *Pseudomonas aeruginosa* y contra *Trichoderma viride*, *Candida albicans*, *Candida krusei* y especies de hongos del Níger (Anees Ahmed *et al.*, 2022). El extracto etanólico de *Opuntia ficus-indica* presentó mayor actividad antimicrobiana contra *Escherichia coli* aislada de pacientes con Infección del tracto urinario. El extracto con etil acetato mostró actividad antibacteriana contra bacterias como *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus* subsp. aureus, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, y *Pseudomonas fluorescens*. La actividad antibacteriana de ambos extractos fue comparada con antibióticos de referencia como Valinomicina, Gentamicina y Ampicilina. La actividad antibacteriana de extractos de cladodios y de cáscara de tuna con metanol, etanol y cloroformo de *Opuntia ficus-indica* contra bacterias gram positivas y gram negativas, puede atribuirse a la presencia de varios compuestos bioactivos (Pourmajed *et al.*, 2021).

5.14 Efecto neuroprotector

La enfermedad neurodegenerativa es una disfunción y/o pérdida progresiva de la estructura y función neuronal, generalmente irreversible, que altera las facultades intelectuales y cognitivas. Este trastorno se presenta en diversas enfermedades que afectan al sistema nervioso central y puede ser agudo o crónico. Entre los trastornos neurodegenerativos crónicos más importantes se encuentran la enfermedad de Alzheimer, la enfermedad de Huntington, la enfermedad de Parkinson y la esclerosis lateral amiotrófica. La degeneración progresiva y/o muerte neuronal provoca síntomas característicos como problemas de movimiento (ataxia) o alteraciones en el funcionamiento cognitivo (demencia) y dado que lamentablemente, la mayoría de los trastornos neurodegenerativos no tienen cura; los tratamientos convencionales sólo se centran en mejorar los síntomas y aliviar el dolor. Los productos naturales y sus compuestos bioactivos son una excelente

fuentes de agentes neuroprotectores para el tratamiento de la neurodegeneración. Aunque probablemente, el efecto neuroprotector de *Opuntia* spp., puede llevarse a cabo a través de múltiples mecanismos, la mayoría de los autores coinciden en que la capacidad antioxidante es la más significativa y/o representativa (Madrigal-Santillán, *et al.*, 2022).

5.15 Enfermedad renal

Se ha reportado que la infusión de flores de tuna muestra un modesto incremento en la diuresis y natriuresis (proceso de excreción de sodio en orina). Sin embargo, en otro estudio sobre los efectos diuréticos y antiuréticos de las infusiones de flores y de cladodios en ratas se encontró que se incrementa la diuresis, pero no influye significativamente en el patrón de comportamiento del ácido úrico. Este efecto fue más marcado cuando se empleó infusión de tuna y fue particularmente significativo durante el tratamiento crónico (Osuna-Martínez *et al.*, 2014).

Conforme se avance en las investigaciones, muy probablemente se continuará expandiendo el conocimiento acerca de los componentes fitoquímicos y de sus mecanismos de acción farmacológicos, lo cual dará un sustento todavía más fortalecido para emplear las diferentes especies de *Opuntia* en la prevención y tratamiento de enfermedades humanas y veterinarias.

VI. Literatura citada

- Abtisam F., Al-Shukri, Farah A., Al-Marzook, Nawal A., Al-Hammadi y Iman H. Mutlag. 2020. Antitumor activity of alkaloids extract from *Opuntia polyacantha* plant using high content screening technique (HCS)". *Pharmacophore*. 11(1), 129-135.
- Adebayo, E. A., Oke, M. A., Aina, D. A., Afolabi, F. J., Ibikunle, J. B. y Adetayo, M. O. 2021. Antioxidant potential of the biosynthesized silver, gold and silver-gold alloy nanoparticles using *Opuntia ficus-indica* extract. *Fountain Journal of Natural and Applied Sciences*. 10(2): 1-14.
- Anees Ahmed, Abdur Rauf, Hassan A. Hemeg, Muhammad Nasimullah Qureshi, Rohit Sharma, Abdullah SM Aljohani, Fahad A. Alhumaydhi, Ibrahim Khan, Amir Alam y Md. Mominur Rahman. 2022. Green synthesis of gold and silver nanoparticles using *Opuntia dillenii* aqueous extracts: Characterization and their antimicrobial assessment. *Hindawi, Journal of Nanomaterials*. ID 4804116, 17 páginas.
- Antunes-Ricardo, M., Gutiérrez-Urbe J. A., López-Pacheco F., Alvarez M. M. y Serna-Saldívar S. O. 2015. *In vivo* anti-inflammatory effects of isorhamnetin glycosides isolated from *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill cladodes. *Indus Crops Prod*. 2015. 76:803-8.
- Birute, A., Juárez, E., Sieiro E., Romero R., y Silencio J. 2009. Los nutraceuticos. Lo que es conveniente saber. *Rev Mex Pediatr*. 76 (3), 136-145.
- González, M., Matos M., López D., Padilla E. y Arguelles M. 1999. Los carotenoides en la salud y en la enfermedad. *Ginecología y Obstetricia*. 45 (2).
- González-Ponce, H. A., Martínez-Saldaña M. C., Rincón-Sánchez A. R., Sumaya-Martínez M. T., Buist-Homan M., Faber K. N., Moshage H. y Jaramillo-Juárez F. 2016. Hepatoprotective effect of *Opuntia robusta* and *Opuntia streptacantha* fruits against acetaminophen-induced acute liver damage. *Nutrients*. 4;8(10):607.
- Inglese-Paolo, Mondragón-Jacobo, C., Nefzaoui A. y Sáenz C. 2018. Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación

- y la Agricultura y el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Roma. ISBN 978-92-5-130494-5 (FAO).
- Izuegbuna, O., Otunola G. y Bradley G. 2019. Chemical composition, antioxidant, anti-inflammatory, and cytotoxic activities of *Opuntia stricta* cladodes. PLoS One. 29;14(1): e0209682.
- Kampamba, M., Ezeala C. C., Hikaambo C. N. y Gono Bwalya A. 2022. *Opuntia stricta* (Haw): A review on its chemical composition, putative *in-vitro* antidiabetic mechanism of action and potential pharmacological uses in chronic disease. J Pharmacon Phytochem. 11(2):01-08.
- Khemiri, I. y Bitri L. 2019. Effectiveness of *Opuntia ficus indica* L. *inermis* seed oil in the protection and the healing of experimentally induced gastric mucosa ulcer. Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 1-17.
- Kim, Y. P., Chan K. y Soo A. E. 2014. Antioxidant and inflammatory mediators regulation effects of the roots of *Opuntia humifusa*. Journal of Applied Biological Chemistry. 57. 10.3839/jabc.2014.001.
- Madrigal-Santillán E, Portillo-Reyes J., Madrigal-Bujaidar E, Sánchez-Gutiérrez M, Izquierdo-Vega J. A., Izquierdo-Vega J., Delgado-Olivares L., Vargas-Mendoza N., Álvarez-González I., Morales-González A. y Morales-González J. A. 2022. *Opuntia* spp. in human health: A Comprehensive summary on its pharmacological, therapeutic and preventive properties. Part 2. Plants (Basel). 6;11(18):2333.
- Mota, J., Muro C., Illescas J., Hernández O. A., Tecante A. y Rivera E. 2020. Extraction and characterization of pectin from the fruit peel of *Opuntia robusta*. Biological Chemistry & Chemical Biology. Full Papers doi.org/10.1002/slct.202002181
- Osuna-Martínez, U., Reyes-Esparza J., Rodríguez-Fragoso L. 2014. Cactus (*Opuntia ficus-indica*): A Review on its antioxidants properties and potential pharmacological use in chronic diseases. Nat Prod Chem Res. 2: 153. doi:10.4172/2329-6836.1000153
- Pourmajed, R., Jabbari A. M., Karami P. y Khaledi A. 2021. Antimicrobial effect of *Opuntia ficus-indica* extract on *Escherichia coli* isolated from patients with urinary tract infection. Iran J Public Health, 50 (3),: 634-636.
- Pulido-Hornedo, N. A., Ventura-Juárez J., Guevara-Lara F., González-Ponce H. A., Sánchez-Alemán E., Buist-Homan M., Moshage H. y Martínez-Saldaña M. C. 2022. Hepatoprotective effect of *Opuntia robusta* fruit biocomponents in a rat model of thioacetamide-induced liver fibrosis. Plants (Basel). 4;11(15):2039
- Ramzan, S. y Saeed M 2020. *Opuntia ficus-indica* as nutritious food ingredient; Prevalence for therapeutic speciality. RADS. J. Biol. Res. Appl. Sci. 11(2):144-153.
- Reyes- Agüero, J. A. 2011. El nopal, un ícono de la patria. Relatos e historias de México. Núm. 33.
- Sanyal, S., Acharya, R., Mukeshkumar B, Rakesh y Gamit. 2016. Toxicological study of *Opuntia elatior* Mill., Fruit (ripen) juice: A folklore medicinal plant. International. 2016. Journal of Green Pharmacy. 9 (4): S39.
- Schepetkin, I. A., Xie G., Kirpotina L. N., Klein R. A., Jutila M. A. y Quinn M. T. 2008. Macrophage immunomodulatory activity of polysaccharides isolated from *Opuntia polyacantha*. Int Immunopharmacol. 8(10):1455-66.
- Sharma, B. R., Park C. M., Choi J. W. y Rhyu D. Y. 2017. Anti-nociceptive and anti-inflammatory effects of the methanolic extract of *Opuntia humifusa* stem. Avicenna J Phytomed. 7 (4): 366-375.
- Sivaraj, R., Balakrishnan A., Thenmozhi M. y Venckatesh R. 2011. Antimicrobial activity of *Aegle marmelos*, *Ruta graveolens*, *Opuntia dellini*, *Euphorbia royleana* and *Euphorbia antiquorum*. IJPSR, 2(1): 132-136 ISSN: 0975-8232

- Stintzing, FC y Carle R. 2005. Cactus stems (*Opuntia* spp.): a review on their chemistry, technology, and uses. *Mol Nutr Food Res.* 2005. Feb;49(2):175-94. doi: 10.1002/mnfr.200400071. PMID: 15729672.
- Taleb J., Ncibi S., Bkhairia I., Smida A., Mabrouki L., Nasri M. y Zourgui L. 2022. Potencial terapéutico del extracto de *Opuntia ficus indica* contra la osteoporosis inducida por cadmio y el daño óseo del ADN en ratas macho. *Revista de Farmacia y Química Tropical.* 2022. 6 (1), 1–14.
- Vela, E.2015. De los usos medicinales del nopal, prehispánicos y actuales. *Arqueología Mexicana.* Especial 62. *El nopal en México.* Editorial raíces, S.A. de C.V. *Catálogo visual.*
- Vicidomini, C., Roviello V. y Roviello G. N. 2021. In Silico Investigation on the Interaction of chiral phytochemicals from *Opuntia ficus-indica* with SARS-CoV-2 Mpro. *Symmetry.* 2021. 13, 1041. [https:// doi.org/10.3390/sym13061041](https://doi.org/10.3390/sym13061041)
- Yahia, EM y Sáenz C. 2011. Cactus pear (*Opuntia* species). In *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits.* Woodhead Publishing. 2011. 290-331e.

Sección: Aprovechamiento del nopal



13. CULTIVARES DE NOPAL EMPLEADOS EN LA CRÍA DE COCHINILLA *DACTYLOPIUS COCCUS* COSTA (HEMIPTERA: DACTYLOPIIDAE)

¹Méndez-Gallegos, S. de J., ²Ortega-Espinoza J. y ³Magallanes-Quintanar, R

¹Postgrado en Innovación en Manejo de Recursos Naturales, Colegio de Posgraduados, *Campus* San Luis Potosí. Iturbide # 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. México. C. P. 78620.

²GranaZac S. A. de R. L. Carretera Villanueva - La Encarnación Km 1.5; Villanueva, Zacatecas. Méx. C. P. 99540.

³Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Av. Ramón López Velarde No. 801, Centro, Zacatecas, Méx. C. P. 98000.

Correspondencia: MGSJ, ORCID: 0000-0002-5481-630X,

jmendez@colpos.mx

Tema	Página
I. Resumen.	213
II. Introducción.	214
III. Requerimientos para la cría de grana.	215
3.1 Cultivares originales o naturales empleados en la cría de la cochinilla.	215
3.2 Hospedantes alternativos recomendados.	217
3.3 Características fisicoquímicas y morfológicas que influyen en el rendimientos y calidad.	219
3.4 Disponibilidad regional de cultivares.	221
3.5 Criterios técnicos a considerar para la elección del cultivar.	223
IV. Recomendaciones técnicas para el establecimiento de plantaciones de nopal para la cría de cochinilla.	223
4.1 Superficie.	224
4.2 Tipo de clima y suelo.	224
4.3 Cultivares de nopal recomendados.	224
4.4 Métodos y densidad de plantación.	224
4.5 Riegos.	224
4.6 Accesibilidad.	224
4.7 Rendimiento.	224
V. Literatura citada.	225

I. Resumen

En este capítulo, inicialmente se esboza un breve recuento histórico de códigos, crónicas, ilustraciones y relaciones geográficas, entre otros, de los principales cultivares empleados en la época Prehispánica y Colonial que confirman la importancia de la especie en la

alimentación, en la medicina y como hospedante de la cochinilla, para nuestros antepasados. También se brinda información sobre las principales características físicas y químicas que es necesario considerar en la selección de los cultivares; así como los principales cultivares de nopal empleados en la cría de la cochinilla, y finalmente se proponen algunos criterios técnicos a considerar para el establecimiento de nuevas plantaciones, con fines de producción masiva de cladodios. Esta información es producto de la experiencia y resultados de investigación generados por los autores y estudiantes, durante más de 30 años; así como de información obtenida con productores cooperantes en diferentes regiones del país. Nuestra intención es incentivar el rescate y revalorización de cochinilla en México y que esta información pueda ser de utilidad a los productores en la toma de decisiones para elegir el cultivar más apropiado en cada hábitat en particular y tengan a su vez mayor certidumbre y maximizar la productividad y competitividad en la producción de cochinilla.

II. Introducción

La cochinilla fina *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae) es una especie de importancia histórica, económica y social en nuestro país. Su importancia radica en ser fuente de un colorante natural, denominado ácido carmínico, el cual es empleado en diferentes industrias a nivel mundial. El proceso productivo de la cría de cochinilla a nivel comercial está conformado por tres elementos principales que se encuentran interrelacionados: 1) Una plantación de nopal que provee el substrato alimenticio necesario, 2) Un sistema productivo de cría del insecto y 3) Un proceso industrial de extracción del principio colorante. En el presente capítulo se abordará la temática relacionada al primer componente, considerado la materia prima clave del sistema agro industrial en la producción comercial de cochinilla.

La cochinilla vive como parásito en varias especies de cactus, particularmente, aquellos pertenecientes a los géneros *Opuntia* y *Nopalea*, que demuestra una alta especificidad por un reducido número de especies y variantes. Una de las principales condicionantes que ha limitado la expansión y consolidación del cultivo comercialmente en México y en el mundo, está relacionada a la elección del cultivar idóneo que genere mayor rendimiento y alta calidad, en función del contenido de ácido carmínico. Considerando la baja disponibilidad regional del Nopal de Castilla, considerado históricamente, desde épocas precolombinas uno de los substrato a naturales, empleados en la cría de cochinilla, se presenta la disyuntiva que especies y cultivares, podría ser empleada como substrato alimenticio, dada la concentración regional del cultivar natural en Oaxaca y Puebla. Adicionalmente, en este proceso de selección es necesario considerar que cada cultivar tiene sus propias características físicas y químicas y qué éstas interaccionan con las condiciones edafoclimáticas en que se desarrollan, resultando en una mayor o menor receptividad al establecimiento del insecto.

Siempre que se planea la escala económica de una unidad para la producción de cochinilla, uno de los criterios técnicos que es necesario considerar es la disponibilidad de cladodios por unidad de superficie y su temporalidad, ya que esto es influenciado por factores físicos (altitud, latitud, suelo, clima, estación de crecimiento, etc.) y biológicos (tipo de cultivar, edad de la planta, capacidad de brotación, recuperación al corte o resiliencia, etc.) los

cuales interactúan de manera dinámica para determinar la productividad de una región a otra.

En México, las plantaciones para la cría comercial de cochinilla se han establecido, principalmente, retomando el modelo Milpa Alta, con una alta densidad de plantación, pero con una reducida separación entre las hileras, lo que dificulta y encarece su producción.

III. Requerimientos para la cría de grana

3.1 Cultivares originales o naturales empleados en la cría de la cochinilla

El uso de la cochinilla en México, se remonta al periodo Preclásico (600 a 650 años a. de C.), esto es lo que se desprende del análisis realizado a una prenda textil, posiblemente, una bolsa o morral de fibras de *Guazuma ulmofilia* (Cuauhtototlán) encontrada en la Cueva del Gallo, en Ticomán, Morelos, México (Ochoa y Román, 2017). También, es posible que en el Preclásico la cochinilla ya se cultivaba en la Mixteca Alta y durante el Posclásico Tardío, ya era uno de los productos tributados a la Triple Alianza por tres provincias de la región de Oaxaca, donde era usado para teñir telas, piedras y madera; también, se empleó en la mayoría de los códices prehispánicos conocidos, excepto en los del área maya (Arqueología Mexicana, 2018).

La cochinilla muestra una marcada preferencia y especificidad por un restringido número de hospedantes. Durante las etapas Prehispánica y Colonial de nuestro país, dicha relación trófica ya estaba planamente identificada y diferenciada. Desde un contexto histórico colonizadores, cronistas y naturalistas, documentaron a través de varias representaciones y evidencias, la diversidad e importancia del nopal, particularmente, ligado al cultivo de la cochinilla. De Sahagún (1577) menciona que *nocheztli* estaba conformado por los términos *nochtli*, “nopal de tuna” y de *eztli*, “sangre”, porque se forma sobre el nopal. Por su parte, Bravo (2002), destaca que los *nochtli* o *nopalli*, comprendían diversas especies, por lo que *nopalnocheztli* hacía referencia al nopal donde se cultivaba la cochinilla y al que, posteriormente, Alzate y Ramírez (1777) denominó *tlapalnopalli* o *tlanopal*, nopal del tinte. No obstante, Martín del Campo (1957) señala que su nombre debería ser *nocheznopalli*, que significa nopal de la grana, en lugar de *nopalnocheztli*, cuyo sentido es grana del nopal. De igual manera, Dupey (2015) coincide con el autor anterior al afirmar que al nopal donde se criaba la cochinilla se le denominaba *nocheznopalli* (Códice Florentino, Capítulo undécimo, Párrafo primero donde se dice como se hacen todos los colores).

González de Oviedo, considerado el primer cronista general de las Indias, publicó en 1535 la primera parte de la *Historia General y Natural de las Indias*, donde aparece, quizás una de las primeras representaciones del nopal. Si bien, de Sahagún (1577) fue uno de los pioneros en aportar una de las ilustraciones más conocidas del nopal, en el Códice de la Cruz-Badiano, Badiano o Barberini (1552) y el Códice Voynich (1568-1578) también se incluyen otras iconografías, aunque menos difundidas. En estos Códices, se les denomina *tlatoc nochtli* y *anochtli*, respectivamente; el nombre que acompaña a esta última ilustración (2.41a) *nāshltli*, probablemente, se refiere a la pronunciación *nochtli* (Tucker & Janick, 2019); sin embargo, de acuerdo con Martín del Campo (1957) en el Códice de la

Cruz o Badiano, se encuentra un aparente contrasentido, cuando al hablar del *teonochtli*, se le representa con la imagen de un órgano (grupo de los *Cereus*). De igual manera, José de Acosta en la *Historia Natural y Moral de las Nuevas Indias* en 1588, hace referencia a los tunales empleados para el cultivo de la cochinilla y a los cuidados a que era sometida. Hernández (1651) en su obra *Historia de las Plantas de las Nueva España*, también incluye una imagen del nopal y se mencionan algunas características, así como su empleo terapéutico. En su obra, *Historia de los Indios de la Nueva España* (1541) reeditada en México como *Relaciones de la Nueva España* en 1956 de Benavente o Motolinía, considerado el pionero de los cronistas, también describe al nopal y sus frutos, así como de sus variantes más apreciadas.

De acuerdo con Martín del Campo (1957), Gonzalo Gómez de Cervantes, redactó en 1599 su memorial *De las Cosas y Gobierno de México y del Beneficio de la Plata y de la Grana*: dedicado al Consejero de Indias Eugenio de Salazar. M. S.", posiblemente de los más completos conocidos hasta ese momento. Este documento se publicó en México en 1944 con el título de *La Vida Económica y Social de Nueva España al Finalizar el Siglo XVI*, en el número 19 de la Biblioteca Histórica Mexicana de Obras Inéditas. En éste, se expone el proceso de cultivo de la grana y de los nopales, incluyendo las épocas de poda y plantación, la eliminación de plantas enfermas o desnutridas, la castración o corte de los frutos cuando pequeños y la limpieza que debe hacerse de malas hierbas, y destaca, cuáles son los enemigos de la grana, enumerando y dibujando a trece enemigos. Pero no es hasta que Alzate y Ramírez en 1777 que aparece el primer estudio en donde se hace una detallada descripción biológica, hábitat, forma de cultivo y procesos para la obtención del tinte, así como del cultivo y cuidados de sus plantas hospedantes. Sin embargo, la primera investigación publicada sobre cochinilla no correspondió a Alzate y Ramírez sino a Juan Caballero, un fraile dominico, cuyas notas aparecieron impresas en junio de 1784 en las páginas de la *Gazeta de México* (Salazar, 2011). Sucesivamente, también Clavijero, (1780) y von Humboldt (1822) abordaron la temática. La mayoría de estos códices, obras, memorias y crónicas tuvieron una difusión restringida a fin de mantener la hegemonía y control de su cultivo.

Del análisis de la literatura de carácter histórico se destaca que la cochinilla fina, solamente se puede reproducir en el nopal, pertenecientes a los géneros *Opuntia* y *Nopalea*. También se pone de manifiesto la gran diversidad genética respecto a color de fruto, forma de los cladodios, densidad de espinas, etc. Pero la mayoría de las obras disponibles señalan que se le registró sobre dos hospedantes, principalmente: *Nopalea cochinillifera* Salm-Dyck (1949) y en el Nopal de Castilla *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. En adición a éstos, Piña (1977) señaló que en su ambiente natural de manera espontánea fina se le puede encontrar sobre el Nopal Pluma o Cascarita (*O. pilífera*). Posteriormente, Piña (1981) también incluyó a *O. tomentosa* var. *Hernandezii*, como uno de los tipos de nopal que tradicionalmente se emplearon desde épocas prehispánicas. Donkin (1977) señala también a *O. dillenii* (Ker-Gawl) Haworth como posible hospedante. Finalmente, Gutiérrez (1972) menciona que los denominados ‘nopalnochestli’ corresponden a: *N. karwinskiana*, *O. hernandezii*, *O. ficus-indica* y *O. megacantha*. Algunas de estas especies ya no se les encuentra en estado silvestre y solo se les puede encontrar en bajas poblaciones, pero siempre bajo protección, en traspatios y huertos, dada su alto grado de domesticación y dependencia del hombre para su supervivencia.

Es importante destacar que en la mayoría de las obras de carácter histórico no todos los autores eran especialistas, sino viajeros, eclesiásticos, militares y muy pocos naturalistas, que pudieran haberse referido a otras especies, dada la riqueza genética del nopal en nuestro país; en adición la información plasmada no era siempre de primera mano, causando con ello confusión, desconocimiento y desinformación. Por ello, Brana (1964) menciona que en la literatura disponible no se puso atención sobre las características de los nopales que los indígenas empleaban en la cría de los insectos. Donkin (1977) también atribuyó esto a la alta variación intraespecífica, presente en el género, acentuado por el proceso de domesticación de las especies de interés. Tal es el caso, que a partir de *O. ficus-indica* se han obtenido híbridos y variantes, algunos tan diversos que se les ha llegado a considerar distintos cultivares, complicando con ello, su identificación taxonómica.

3.2 Hospedantes alternativos recomendados

Al iniciarse en el cultivo de la cochinilla una de las principales condicionantes de los productores para la toma de decisiones, que ha limitado el éxito, rescate y fomento de la cochinilla en México, está relacionada a cuál de la amplia diversidad genética presente en el país es la idónea, ante la escasa disponibilidad del Nopal de Castilla, hospedante natural del insecto, que se presenta en algunas regiones. A pesar de que nuestro país posee la mayor diversidad genética de especies y cultivares de nopal; así como una gran variedad de híbridos, sólo un reducido número se puede considerar aptas para ser empleadas como hospedantes para el insecto, de igual manera muchos de ellos, aún no se han valorado como sustrato potencial, en función del rendimiento. Es importante destacar que en el proceso de búsqueda y selección de cultivares sobresalientes para la cría de cochinilla se pueda haber desechado algunos de ellos que podrían resultar interesantes, debido a que en muchos estudios sólo se llegó a la selección en base al peso fresco o seco y no en función del contenido de ácido carmínico, al no contar con los equipos necesarios para su cuantificación.

Para ejemplificar lo anterior a nivel internacional, Piña (1981) destaca que en la región de Ayacucho, Perú, donde se produce de manera espontánea la cochinilla, predominan poblaciones silvestres de *Opuntia streptacantha*. Esta misma especie también ha sido reportada como sustrato alimenticio en México (Mann, 1969); sin embargo, la alta densidad de espinas complica la cosecha y su utilización en la cría intensiva de cochinilla en semiconfinamiento. En Argentina, de Haro y Claps (1999) y Diodato *et al.* (2004) la reportaron sobre *O. ficus-indica* 'asilvestrada'. Por su parte, Bustamente (2010) destaca que la especie empleada en las nuevas áreas de producción en el sur de Perú, el norte de Chile, Cochabamba (Bolivia) y Etiopía, es *O. ficus-indica*, de fruto rojo, verde con pulpa blanca, rojo, y blanco, y amarillo, pero con presencia de espinas, respectivamente. Anculle-Arenas *et al.* (2017) resaltan que en el sur de Perú se emplean cultivares Amarilla, Blanca y Morada, predominando este último con un 95 %. De acuerdo con Campana *et al.* (2015) se considera que la cochinilla cambió de un huésped ancestral a *O. ficus-indica* en América del Sur, y luego se extendió hacia el norte tras la introducción de *O. ficus-indica* a través de los continentes.

La tendencia que se ha observado en los recientes emprendimientos para la cría intensiva de cochinilla a nivel internacional está focalizado al empleo de variantes inermes,

denotando que éstas facilitan el proceso productivo del insecto; también, al presentar menor densidad de espinas, la superficie de infestación es mayor que en otras especies. En nuestro país, ante la ausencia y la distribución restringida de las especies y cultivares empleados tradicionalmente desde las épocas Prehispánica y Colonial (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck, *Opuntia tomentosa* y *O. pilífera*), se ha retomado la dirección seguida en otros países, mediante la utilización de cultivares inermes. De igual manera se ha registrado que en algunas variantes a pesar de la ausencia de espinas o con poca espina, no se ha encontrado buena respuesta al establecimiento de la cochinilla, entre estos destacan: Rojo Pelón, Liso Forrajero, Camuesa, Liso Blanco y en ocasiones también se ha registrado, dependiendo de la zona de cultivo, resistencia en Milpa Alta. Por el contrario, una de las variantes que a pesar de presentar un mayor grado de espinas ha resultado un excelente hospedante es el cultivar *Tlaxcalalcingo*, aunque es más complicado su manejo.

A partir de los 80's del siglo pasado la comunidad científica y académica y empresas, conjuntaron esfuerzos para rescatar el cultivo y fomentar aprovechamiento de la cochinilla en México, estableciéndose varios programas y proyectos para incentivar, a través de organismos oficiales, instituciones de enseñanza e investigación y organismos no gubernamentales, la mayoría de ellos con poco éxito (Pérez-Sandi, 2001). Entre la problemática detectada destaca la elección, la disponibilidad y temporalidad de los cultivares de nopal en las diferentes regiones del país donde se tuvieron estas iniciativas, ya que mostraron diferente grado de infestación y se reflejó directamente en bajo rendimiento, causando desaliento y abandono de los productores.

A pesar de que México es considerado uno de los países con mayor diversidad genética, solo 20 variantes son cultivadas a nivel comercial, principalmente, como alimento y forraje (Chávez-Moreno *et al.*, 2013); aunque Campana *et al.* (2015) señalan que *D. coccus* puede sobrevivir en un amplio rango de especies hospedantes, en condiciones naturales la cochinilla tiene selectividad de parasitar determinadas especies y cultivares, ya que coexiste exclusivamente en especies de la familia Cactácea, particularmente de los géneros *Opuntia* y *Nopalea*; a pesar de esta restricción y preferencia, Portillo (2008) registró 15 especies de *Opuntia* y dos de *Nopalea* como hospedantes, la mayoría de ellas, con presencia de espinas grandes y numerosas. Por su parte, Chávez-Moreno *et al.* (2010) registraron 12 especies de *Opuntia* y una de *Nopalea*, tanto inermes como formas espinosas, destacando por su distribución y variantes utilizadas, *O. ficus-indica*. En un estudio posterior, Chávez-Moreno *et al.* (2013) menciona que la cochinilla fina es una de las especies del género que cuenta con el número más reducido de hospedantes (siete) en México.

Como resultado del proceso de selección de hospedantes se puede deducir que la cochinilla prefiere variantes de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. sobre otras especies y cultivares; aunque derivado de esa interacción planta-insecto, se generan diferencias en calidad y rendimiento (Zacarías-Alvarado *et al.*, 2021). *O. ficus-indica* es considerada la cactácea de mayor importancia económica en México y el mundo, dado que se cultiva para fruta, forraje y también como hospedante de la cochinilla (Reyes-Agüero *et al.*, 2005; Ervin, 2012). Se considera que se le domesticó en México y nuestro país posee la mayor riqueza de cultivares (Bravo, 1978). Sin embargo, ante la escasa disponibilidad de los hospedantes naturales en el resto del país, se han sometido a evaluación cultivares alternativos de importancia frutícola, forrajera u hortícola (Zacarías-Alvarado *et al.*, 2021). Estudios

previos destacan que el hospedante utilizado influye tanto en el rendimiento (Tovar *et al.*, 2005; Méndez-Gallegos *et al.*, 2010; Tovar y Moreno, 2010) como en la calidad (Coronado-Flores *et al.*, 2013). Tomando en cuenta que Chávez-Moreno *et al.* (2011) registraron que en México la especie más común y con mayor distribución es *O. ficus-indica*, es factible utilizar estas variantes en el cultivo de la cochinilla. Entre los cultivares que se han empleado comúnmente como sustrato destacan: Nopal de Castilla, Atlixco y Villanueva; no obstante, existen limitaciones para su uso generalizado a nivel nacional, dada su restringida disponibilidad geográfica.

Como resultado del proceso de domesticación orientado a la selección de cladodios sin espinas, *O. ficus-indica* puede diferenciarse de todos los otros miembros del género por cladodios usualmente elípticos, por lo general de color verde pálido a verde oscuro, de gran talla, carentes total o casi totalmente de espinas, frutos grandes, dulces y carnosos, y por encontrarse exclusivamente en ambientes modificados por el hombre para su supervivencia; debido a ello, todos los cultivos se localizan en ambientes protegidos (Reyes-Agüero *et al.*, 2005). Sobre este último aspecto, López-Palacios y Peña-Valdivia (2020) señalaron que durante su proceso de domesticación, las especies del género *Opuntia* pierden su capacidad de supervivencia en la naturaleza. Esta vulnerabilidad de ser consumidos por herbívoros y logomorfos, es considerada una limitante importante, ya que no puede establecerse en áreas abiertas sin protección e implica un reto para su conservación y protección, ante su alta vulnerabilidad.

La correcta determinación de las relaciones sistemáticas de esta especie representa un enorme reto, porque ha sido sometida por miles de años a presiones de selección artificial por diferentes grupos culturales, en ambientes distintos, y con diversos propósitos; además, su distribución geográfica original ha sido modificada (Reyes-Agüero *et al.*, 2005). Para clarificar la alta variación morfológica, Gallegos-Vázquez *et al.* (2011) agruparon en un mismo cluster los cultivares Milpa Alta, Atlixco y COPENA V1, lo que confirma que comparten ciertos atributos y características morfológicas; de igual manera, existe diferenciación con el Rojo Pelón (empleado en la producción de fruto) y COPENA F1 (usado como forraje). Esta alta variación morfológica es resultado de la coexistencia de cultivares de interés para el hombre, se establecieron en sitios que facilitaron la simpatria artificial y la ocurrencia de procesos de hibridación y poliploidía (Reyes-Agüero *et al.*, 2005). Este polimorfismo, ha sido favorecido por el flujo genético natural, a la coincidencia en los periodos de floración y a que comparte visitantes florales y polinizadores (Pimienta, 1986).

3.3 Características físico-químicas y morfológicas que influyen en el rendimiento y calidad

En la práctica se han observado resultados contrastantes sobre la supervivencia, fertilidad, rendimiento y calidad de la cochinilla, de acuerdo a los cultivares empleados como sustrato alimenticio, incluso se ha observado que ésta, no muestra un comportamiento similar en el mismo cultivar producido en diferentes regiones. Esto podría estar relacionado a características químicas (presencia de compuestos secundarios), fisiológicos (estatus hídrico y nutricional) y morfológicos (grosor de la cutícula, presencia de oxalatos de calcio) influenciadas por la interacción con las condiciones edafoclimáticas, de la región

donde se produce el nopal. Sin embargo, existen pocos estudios donde se valore el comportamiento productivo de la cochinilla en diferentes substratos alimenticios (Zacarías-Alvarado *et al.*, 2021).

Entre las principales características que han permitido al nopal adaptarse y sobrevivir en los diversos ambientes, incluyen el desarrollo de diversas estructuras y mecanismos que inician exteriormente con la presencia de espinas, tricomas y vellosidades, las cuales pueden funcionar como una primera línea de defensa. De acuerdo a la disposición y distribución de éstas pueden complicar el libre movimiento y establecimiento de las ninfas migrantes, por lo que la recolección de las adultas resulta más laboriosa y su corte y manejo requiere de mayor cuidado; derivado de lo anterior, los cultivares con presencia de espinas son menos recomendables como hospedantes de la cochinilla. A pesar de ello, en Perú, Bolivia y España se pueden encontrar este tipo de variantes con presencia de cochinilla.

Un segundo sistema defensivo lo constituye la capa frontera constituida por la cutícula, la cual no es digestible para organismos, y la epidermis (Gibson y Nobel, 1986). Bajo esta cobertura se ubica una capa de cristales de oxalatos de calcio. Al respecto, Tovar y Pando (2010) observaron que los oxalatos de calcio y el calcio disuelto se asociaron negativamente con un bajo rendimiento y al parecer el grosor de la cutícula no tuvo influencia en el establecimiento. De igual manera, Coronado-Flores *et al.* (2015) registraron que el contenido de oxalatos de calcio y el grosor de la cutícula influyeron negativamente en el número de hembras por cladodio. A su vez, el grosor de la cutícula presentó una correlación positiva con el contenido de oxalatos de calcio; es decir, conforme aumenta el grosor de la cutícula también aumenta el contenido de oxalatos de calcio. Este aspecto reviste especial importancia y debe ser considerado en la producción comercial del insecto, ya que influye negativamente sobre el número de hembras por cladodio. De acuerdo con Méndez-Gallegos *et al.* (2003) la presencia y grosor de la capa de oxalatos de calcio en la pared de las células epidermales, posiblemente impiden la inserción de estiletes del insecto, evitando con esto su anclaje y posterior alimentación.

Posteriormente, se ubica el clorénquima, conformada por células de color verde, donde se realiza el proceso fotosintético. La parte más interna del cladodio, denominada parénquima se caracteriza por la presencia de grandes vacuolas, cuya función principal es el almacenamiento de agua e imparte el carácter de succulencia (Gibson y Nobel, 1986). Padilla (2018) registró que precisamente es en esta capa donde se observaron una mayor cantidad de los estiletes de la cochinilla alimentándose.

En condiciones naturales se ha observado que la cochinilla muestra preferencia por fijarse y alimentarse en la parte superior de la planta, donde se ubican los cladodios en desarrollo y ‘renuevos’; por ello, en los sistemas de cría comercial es importante considerar la edad del cladodio a emplear, para asegurar el éxito del proceso productivo. Al respecto, Vigueras (2010) menciona que la edad más recomendable oscila entre 8 y 18 meses, puesto que a menor edad no se encuentran aptas para concluir el ciclo biológico del insecto y aquellas de mayor edad son más fibrosas, por lo que dificulta que las ninfas inserten su estilete y mueren. De igual manera, Arroyo-Figueroa *et al.* (2021) observaron que la edad del cladodio afectó el rendimiento de cochinilla, ya que los cladodios de ocho meses produjeron el doble de peso seco (2.5 g), que los de cuatro meses (1.2 g); pero la edad no influyó sobre el contenido de ácido carmínico. Respecto a las dimensiones del cladodio

registraron que el peso, largo, ancho y grosor se asocian con mayor peso seco de cochinilla; mientras, que a mayor peso y grosor del cladodio se obtiene menor contenido de ácido carmínico. De igual manera Tovar y Pando (2010) registraron una correlación positiva del largo del cladodio con alta producción de cochinilla.

La disponibilidad de nutrientes también es un factor que debe ser tomado en consideración, ya que ésta pueden influir sobre el desarrollo, reproducción y calidad de la cochinilla; sin embargo, limitado conocimiento y los pocos estudios sobre la condición nutricional son inconsistentes y poco claros, requiriendo de estudios más detallados y precisos. En un estudio posterior, Vigueras y Portillo (1992) determinaron que la ausencia de calcio, magnesio, sodio, y potasio en el cladodio, favorecen el desarrollo de la cochinilla y es posible obtener hasta 19% de ácido carmínico, si no se aplica. Por su parte, Tovar *et al.* (2008) afirman que la concentración de nitrógeno y zinc favorecen el rendimiento del insecto. Sucesivamente, Tovar y Pando (2010) observaron que la alta producción de cochinilla se correlacionó positivamente con el largo del cladodio y el contenido de potasio. Coronado-Flores *et al.* (2015) registraron una correlación positiva entre el contenido de nitrógeno en el cladodio y el número de hembras; pero, éste influyó negativamente en el contenido de ácido carmínico. Estos resultados y tendencias muestran que el estado nutricional del nopal puede influir en el rendimiento y calidad de la cochinilla.

En una reciente investigación, Padilla (2018) estudió la interacción de la cochinilla con el cladodio a nivel de la alimentación y las interacciones del estilete con las diferentes capas del nopal. La composición química de cladodios en sus diferentes capas mostró que los componentes mayoritarios son los carbohidratos, principalmente, ácido galacturónico, glucosa, fructosa y sacarosa, focalizándose particularmente, en el parénquima. Éste fue uno de los sitios donde se encontró con mayor frecuencia la punta del estilete, por lo que pudiera ser atrayente para la cochinilla. Los aminoácidos se detectaron sólo en la capa del clorénquima, lejano al sitio donde se localizaron los estiletes de las cochinillas, por lo que, aparentemente, no son un blanco de la cochinilla como fuente de alimentación. La composición de ácidos orgánicos se relaciona con el metabolismo ácido de las crasuláceas. Sin embargo, algunos de los ácidos identificados pueden ser de interés en la cochinilla como fuente de metabolitos de alguna ruta metabólica importante, sobre todo la del ácido carmínico, que hasta el momento se desconoce. No se encontró una correlación entre la longitud de estilete de la cochinilla y la etapa de desarrollo.

3.4 Disponibilidad regional de cultivares

Actualmente el cultivo del nopal en nuestro país, ya no se restringe a las zonas áridas y semiáridas, sino que debido a su amplia adaptación se encuentra distribuido en una gran variedad de zonas con condiciones edafo-climáticas diversas. En el Cuadro 1 se muestran las principales zonas productoras, en donde ya se han tenido experiencias previas en el cultivo de cochinilla y la disponibilidad de cultivares recomendados.

Es importante resaltar que las variantes recomendadas en el cuadro anterior son glabras o inermes para facilitar su manejo y con la ventaja de utilizarse potencialmente también, como fuente de nopalito o forraje. Adicionalmente, existen otras variantes locales menos conocidas, que se han introducido a través de diversos programas para la producción de nopalitos o con fines forrajeros que pueden ser aprovechadas en la cría de cochinilla.

De acuerdo a información proporcionada por el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP (2022) nuestro país posee una superficie de 12,485 ha para la producción de nopalito. En ella, participan 28 estados del país, destacando aquellos ubicados en la Región Centro con 8,294 ha; esta zona contribuye con 67 % de la superficie total. En la Región Sur del país es donde se ubica la menor superficie con solo 611 ha (Figura 2). De igual manera para 2020 se registraron en el SIAP, aproximadamente, 17,000 ha de nopal forrajero, concentradas principalmente en el norte del país, cuyos cultivares, también pueden ser hospedantes potenciales de la cochinilla.

La información vertida aquí facilita la toma de decisiones y podría coadyuvar a reducir los costos de flete y traslado y maximizar la eficiencia productiva. Sin duda, es necesario desarrollar e implementar un programa de selección, mejoramiento y propagación de nopal con fines de ser utilizados en el cultivo de la cochinilla, que aseguren alto rendimiento y calidad. Sin embargo, en tanto se establecen esos emprendimientos, se requiere continuar valorando otros cultivares criollos o regionales que podrían ser de interés para su empleo como sustrato en la cría de cochinilla.

Cuadro 1. Zonas productoras actuales y potenciales y disponibilidad de cultivares recomendados para el cultivo de cochinilla fina.

Región del país	Estados	Cultivares disponibles recomendados
Sur	Oaxaca, Puebla, Veracruz Y Yucatán. Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo,	Nopal de castilla y Atlixco.
Centro	Tlaxcala, Michoacán, Morelos, Guerrero y Querétaro.	Atlixco, Italiano, Copena v1, Villa de tezontepec, Negrito, Blanco.
Centro-norte	Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Nayarit, San Luis Potosí y Zacatecas.	Villanueva, Jalpa, Chicomoztoc, Esmeralda, Italiano, Copena v1, Pabellón.
Norte	Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Sinaloa, Sonora y Tamaulipas.	Villanueva, Jalpa, Esmeralda, Copena v1, Copena fl, Manso



Figura 2. Disponibilidad de nopalito por región, con potencial de ser empleados en el cultivo de la cochinilla fina.

3.5 Criterios técnicos a considerar para la elección del cultivar

Aunque por cuestiones prácticas es posible utilizar cultivares de nopal que se encuentran disponibles en cada región; es necesario considerar que los mecanismos genéticos de resistencia son influenciados por la interacción genotipo-ambiente, por lo que puede haber una modificación en la respuesta al establecimiento del insecto, de ahí la necesidad de realizar evaluaciones previas para definir su aptitud como sustrato alimenticio. Algunos criterios técnicos a considerar en la selección se mencionan a continuación:

1. Características morfométricas del cladodio (longitud media 25-35 cm, ancho 15 a 20 cm, grosor 2 a 3 cm y podario poco prominente)
2. Susceptibilidad al establecimiento de la cochinilla
3. Alta producción de biomasa
4. Cladodios glabros o inermes (sin espinas)
5. Recuperación al corte
6. Resistentes al ataque de roedores y logomorfos como liebres, conejos (requiere de protección, sobre todos en zonas con escasez de recursos)
7. Resistencia a heladas y sequías recurrentes
8. Resistencia a plagas y enfermedades
9. Disponibilidad de material de propagación

IV. Recomendaciones técnicas para el establecimiento de plantaciones de nopal para la cría de cochinilla

El ciclo completo de cría comercial de la cochinilla fina está integrado por tres componentes principales:

- a) Una plantación de nopal que proporciona la materia prima o sustrato de alimentación,
- b) La tecnología de cría del insecto y
- c) El proceso de extracción industrial del principio colorante.

Derivado de lo anterior, siempre que se planea la escala económica de una unidad para la producción de cochinilla, uno de los primeros factores que es necesario considerar, es la disponibilidad de cladodios de manera constante, por unidad de superficie y tiempo. Esto es influenciado por el clima, la altitud, latitud, el tipo de suelo y las características de la variante de nopal, entre otros, los cuales interactúan para definir la productividad en una zona u otra.

Uno de los factores que ha causado mayor controversia en la cría comercial de cochinilla, es sin duda, el sistema de plantación a utilizar, ya que existe una asimetría en los sistemas productivos utilizados. En diversos proyectos se han recomendado métodos o arreglos similares a los que se emplean en la producción de nopalito, caracterizados por el reducido espacio entre hileras que dificulta la extracción de los cladodios de la plantación, al tener que realizarlo de manera manual mediante carretillas. Esto implica mayor cantidad de mano de obra, lo que se refleja en un incremento en los costos de producción.

El modelo integral de cría intensiva de grana cochinilla en cautiverio, considera la intervención de un binomio: nopal-cochinilla; es decir, es la combinación de dos sistemas productivos. Por un lado, se requiere de un sistema de producción de nopal donde éste fungirá como hospedante y substrato alimenticio del insecto y por otra parte, el proceso de crianza del insecto, los cuales tienen distintos requerimientos.

4.1 Superficie

Inicialmente se debe considerar disponer de la superficie suficiente para producir el número de pencas o cladodios necesarios para abastecer el sistema de cría (Plantas en pie, macrotúneles. Invernadero, etc.). Con fines prácticos se estima que se requiere una superficie de tres hectáreas de nopal, con una densidad de 25,000 plantas por hectárea para 1500 m² de invernadero; es decir, aproximadamente un millón de pencas al año, que son empleadas para ocupar la capacidad máxima de la unidad productiva.

4.2 Tipo de clima y suelo

Aunque en otro capítulo de esta obra se abordarán aspectos de manejo del nopal, de manera breve se detallan a continuación algunos aspectos a considerar en el establecimiento de nuevas plantaciones: zonas libres de heladas e inviernos benignos, temperatura media anual de entre 16 a 20°C y una precipitación entre 300-700 mm. A pesar de que el nopal no es muy exigente en cuanto al tipo y calidad de suelos se recomienda seleccionar aquellos terrenos no muy pobres, que tengan al menos de 1.5 a 2% de materia orgánica, pH de neutro a ligeramente ácido y una profundidad de 30-40 cm y pueden ser de textura franca a ligeramente arcillosa.

4.3 Cultivares de nopal recomendados

Tomando en cuenta que la cochinilla presenta especificidad por ciertas variedades de nopal, es importante disponer del material vegetal idóneo para el mejor desarrollo y calidad del insecto. Se han identificado cinco cultivares, con las cuales se han obtenido rendimientos altos, en cuanto a peso seco y calidad, éstas son: Nopal de Castilla, Atlixco, Villanueva, COPENA V1 y Esmeralda; éstas presentan una alta distribución en el país y existe disponibilidad suficiente de material para su propagación. Al adquirir cladodios como simiente, es necesario considerar las disposiciones obligatorias que implementa el Gobierno Federal para evitar la movilización de material de propagación infestado con alguna plaga o enfermedad.

4.4 Método y densidad de plantación

El sistema de plantación recomendado es de tipo “melga”, dado que es el que presenta las mayores ventajas desde un punto de vista práctico y económico. El modelo consiste en establecer cuatro hieleras con una separación de 75 cm, una distancia entre plantas de 30 cm y una separación entre melgas de 3 m. Esta distribución permite contar con una densidad de población de aproximadamente 20,000 a 25,000 plantas por hectárea (Figura 2).

4.5 Riegos

Considerando que la mayor limitante en la cría de cochinilla es la disponibilidad oportuna y permanente de cladodios, es necesario considerar la disponibilidad de aplicar de dos o tres riegos de auxilio en los meses con mayor sequía (abril-junio). Es importante que en la selección del sitio donde se ubicará la zona de producción disponga de vías de acceso adecuadas, a fin de que no se generen costos adicionales a la producción.

4.7 Rendimiento

En relación a la productividad, cuando se trabaja con el segundo nivel de crecimiento de la planta madre, es posible llegar a producir un promedio de 10 pencas por planta; en cambio en un tercer nivel se podría obtener un promedio de 20 pencas por planta, lo que equivale a más de un millón de pencas en las tres hectáreas. Esta producción permite abastecer un invernadero de las dimensiones consideradas anteriormente (1,500 m²). Cabe mencionar que el tercer nivel de las plantas se alcanza al tercer año de plantación, dependiendo de la región; esto coincide con la máxima capacidad del invernadero, dado que éste estaría en posibilidades de estar produciendo al 100 % en el segundo año de producción.



Figura 2. Algunos genotipos de nopal para cultivar la grana, de izquierda a derecha y de arriba para abajo, Copena F-1, Esmeralda, Oaxaca tipo Atlixco y cultivo de nopal en “melgas” conteniendo cuatro hileras. Al final, panorámica de cultivo de grana en condiciones controladas con un productor en Villanueva Zac.

V. Literatura citada

- Anculle, A. A., Castro C. V. y Julca O. A. 2017. Caracterización de fincas productoras de tuna (*Opuntia ficus-indica*) para la producción de cochinilla del carmín (*Dactylopius coccus*) en La Joya (Arequipa, Perú). *Aporte Santiaguino* 10(2): 245-258.
- Alzate y Ramírez, J. A. de. 1777. Memoria en que se trata del insecto grana o cochinilla, de su naturaleza, y serie de su vida, como también del método para propagarla, y reducirla al estado en que forma uno de los ramos más útiles del comercio, escrita en México en 1777 por D. Josef Antonio de Alzate. Edición facsimilar, Archivo General de la Nación. 3 (26), 199-259.
- Arqueología Mexicana. 2018. Grana cochinilla. En: Rojo el color de la vida. Arqueologíamexicana.mx. Edición especial 80. pp:60-90.
- Arroyo-Figueroa, G., Medina-Saavedra T., Pérez-Sánchez R. E., y Ortiz-Rodríguez R. 2021. Morfología y edad del cladodio de *Opuntia ficus-indica* sobre la producción de *Dactylopius coccus* costa y contenido de ácido carmínico. *Nova scientia*, 12(25), 00019. Epub 17 de febrero de 2021.
- Brana, D. D. 1964. Cochineal: aboriginal dyestuff from Nueva España. En: *Actas y Memorias del XXXVI Congreso Internacional de Americanistas*, 2:77-91.
- Bravo, H., H. 1978. Las Cactáceas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Tomo I. pp: 167-210.
- Bravo, H. H. 2002. Pencas de antaño. En: *El Nopal. Artes de México* 59:8-15.
- Bustamente, J. A. 2010. Producción y mercado de la cochinilla (experiencias recopiladas en Perú, Chile, Bolivia y Etiopía). En: Portillo, L. y A. L. Vigueras (eds.). *Conocimiento y Aprovechamiento de la grana cochinilla*. Universidad de Guadalajara, México. pp:163-171.
- Campana, M. G., Robles G., N. M., & N. Tuross. 2015. America's red gold: multiple lineages of cultivated cochineal in Mexico. *Ecology and Evolution* 5(3):607-617.
- Catálogo Nacional de variedades vegetales. 2021. Consultado 25 noviembre 2022. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/692266/CNVV_2021-FINAL-TODAY.pdf
- Chávez-Moreno, C. K., Tecante A., Casas A., y Claps L. E. 2011. Distribution and habitat in Mexico of *Dactylopius* Costa (Hemiptera: Dactylopiidae) and their cacti hosts (Cactaceae: Opuntioideae). *Neotropical Entomology* 40(1): 62-71.
- Chávez-Moreno, C.K., Tecante, A., Fragoso-Serrano, M., Rogelio, P. .M., Casas, A., Claps, L. E., Ramírez-Puebla, S. T., Rosenblueth, M. y Martínez-Romero, E. 2013. The *opuntia* (Cactaceae) and *Dactylopius* (Hemiptera: Dactylopiidae) in Mexico: a historical perspective of use, interaction and distribution with particular emphasis on chemical and phylogenetic aspects of the *Dactylopius* species. *Acta Hort.* 995, 367-377.
- Clavijero, F. J. 1917. [1780]). *Historia antigua de México*. De Mora, J. (trad.). Departamento Editorial de la Dirección General de las Bellas Artes. México. 488 p.
- Coronado-Flores, V., Tornero-Campante M. A., Núñez-Tovar R., Jaramillo-Villanueva J. L. y Méndez-Gallegos S. de J. 2015. Productividad de cochinilla *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae) en cladodios de *Opuntia ficus-indica* (Cactacea) con diferentes tratamientos de fertilización. *Acta Zoológica Mexicana*, 31(2): 183-189.
- De Benavente, T. 1956[1541]. *Historia de los Indios de la Nueva España*. Universidad Nacional Autónoma de México (Biblioteca del Estudiante Universitario; 72) / Coordinación de Humanidades (UNAM. México. 154 p.

- De Haro, M. E., y Claps L. E.. 1999. Primera cita de *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae) para la República Argentina. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 58(3-4):128.
- De Sahagún, B. 1577. Historia General de las Cosas de la Nueva España, II. Juan Carlos Temprano (ed). App Editorial. México. pp: 613-1179.
- Diodato, L. Iturre M. y Paz M. E. 2004. Especies de *Dactylopius* en Argentina y factores que inciden en su producción. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*. 11: 67-72.
- Donkin, R. A. 1977. Spanish Red: An Ethnogeographical Study of Cochineal and the *Opuntia* Cactus. *Transactions of the American Philosophical Society* 67:1-84.
- Ervin, G. N. 2012. Indian fig cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) in the Americas: an uncertain history. *Haseltonia*. 17:70-81.
- Flores-Alatorre, H. L., Abrego-Reyes V., Reyes-Esparza J. A., Angeles E. y Alba-Hurtado F. 2014. Variation in the concentration of carminic acid produced by *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopidae) at various maturation stages. *Journal of Economic Entomology* 107(4): 1700-1705.
- Gallegos-Vásquez, C., Barrientos-Priego A. F., Reyes-Agüero J. A., Núñez-Colín C. A. y Mondragón-Jacobo C. 2011. Clusters of commercial varieties of cactus pear and xoconostle using UPOV morphological traits. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 13:10-22.
- Gibson, A. C. y Nobel P. S. 1986. *The cactus primer*. Harvard University Press. 286 p.
- Gómez de Cervantes, G. 1944[1599]. *La Vida Económica y Social de Nueva España al finalizar el siglo XVI*. Biblioteca histórica mexicana de obras inéditas, 1. Antigua Librería Robredo, de José Porrúa e Hijos. México 1944. 218 p.
- Gutiérrez, C. A. 1972. Nopalnocheztli. *Cact. Suc. Mex.* 37 (2): 51-54.
- Hernández F. (1651). *Rerum medicarum Novae Hispaniae Thensaurus*. Roma, Tip. Vital Mascardi.
- López-Palacios, C. y Peña-Valdivia C. 2020. Screening of secondary metabolites in cladodes to further decode the domestication process in the genus *Opuntia* (Cactaceae). *Planta*. 251:74 <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03371-9>
- Mann, J. 1969. Cactus feeding insects and mites. *U. S. Natl. Mus. Bull.* 256:1-158.
- Martín del Campo, R. 1957. Las cactáceas entre los mexicas. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas*. 2(2): 27-39.
- Ochoa C., P. y Román T. R. L. 2017. Urdimbres enlazadas de Mesoamérica. *Textil de la Cueva del Gallo, Morelos, México. PreColumbian Textile Conference VII / Jornadas de Textiles PreColombinos VII*. 2.
- Pérez-Sandí C. M. 1999. Referencias Históricas del Uso de la Grana Cochinilla. En: Cría de la grana cochinilla para la producción de su pigmento. En: Llanderal C., C. y R. Nieto H. (eds). Colegio de Postgraduados. México. pp. 1-22.
- Piña, L., I. 1977. La grana cochinilla del nopal. *Monografías de Laboratorios de Fomento Industrial (LANFI)*. México. 1: 1-54.
- Piña L., I. 1981. Observaciones sobre la grana y sus nopales hospederos en el Perú. *Revista Cactáceas y Suculentas Mexicanas*. 26(1): 10-15.
- Portillo, L. 2008. Los nopales hospederos norte y sudafricanos de Dactylopiidae. En: Llanderal, C. C., D. H. Zetina, A. L. Vigueras y L. Portillo (eds.) *Grana cochinilla y colorantes naturales*. Colegio de Postgraduados. México. pp. 52-57.
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre, R. J. R. y Carlin, C. F. 2004. Análisis preliminar de la variación morfológica de 38 variantes mexicanas de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. En: Esparza F.

- G., Valdez Z., R. D. y S. J. G. Méndez (eds.), El Nopal, Tópicos de Actualidad. México, D.F.: Universidad Autónoma de Chapingo y Colegio de Posgraduados. pp:21–47)
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre-Rivera J. R. y H. Hernández M. 2005. Systematic notes and a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L) Mill. (CACTACEAE). *Agrociencia*, 39(4):395-408.
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre J. R., Castelán F. y González A. 2009. Catálogo de las principales variantes silvestres y cultivadas de *Opuntia* en la altiplanicie meridional de México. México, D.F: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología. 350 p.
- Salazar Velázquez, V. 2011. Historia natural, cría y beneficio de la grana cochinilla en las imágenes científicas y técnicas de la Memoria de José Antonio Alzate . Ciencia y Cultura entre dos mundos. Nueva España y Canarias como ejemplos de *Knowledge in Transit* . Web. 5 May 2011
- SIAP. 2022. Servicio de Información Agraria y Pesquera. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). Producción agrícola, Avance de siembras y cosechas. Accesado 29 de noviembre 2022.
- Tellez, O. 1911. La cochinilla o grana. Secretaría de Fomento o grana. Boletín de la Dirección de Agricultura.1:244-252.
- Thiery de Menonville, N. J. 2005 [1787]. Tratado del cultivo del nopal y de la crianza de la cochinilla, precedido de un viaje a Guajaca. José Pérez Moreno Anaya (trad.) Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. Mirada Viajera. México. 433 p.
- Tovar, A., Pando-Moreno M. y Garza C. 2005. Evaluation of three varieties of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller as hosts of the cochineal insect *Dactylopius coccus* Costa (Homoptera: Dactylopiidae) in a semiarid area of northeastern Mexico. *Economic Botany* 59(1): 3-7.
- Tovar, P. A. y Pando M. 2010. Factores físicos y químicos del nopal que inciden en la producción de grana fina *Dactylopius coccus* Costa (Homoptera: Dactylopiidae). En: Portillo, L. y A. L. Viguera (eds.) Conocimiento y aprovechamiento de la grana cochinilla. Universidad de Guadalajara. pp. 113-132.
- Tucker, A. O. y J. Janick. 2019. Flora of the Voynich Codex, An Exploration of Aztec Plants. Springer. pp:113-114. DOI:10.1007/978-3-030-19377-5
- Viguera, A. L. y Portillo L. 1992. Determinación del contenido de ácido carmínico en nueve tratamientos aplicados a *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. y su relación con la calidad de la grana cochinilla. En: Memorias de II Congreso Internacional de Tuna y Cochinilla, Santiago de Chile. pp:7781.
- Viguera, A. L. 2010. Factores bióticos y abióticos que influyen en la grana cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa). En: Portillo, L. y A. L. Viguera (eds.) Conocimiento y aprovechamiento de la grana cochinilla. Universidad de Guadalajara. pp: 87-100. Von Humboldt, A. 1822[2002]. Ensayo político sobre el reino de la Nueva España. Ed. Porrúa. México. 696 p.
- Zacarias-Alvarado, J. R., Tovar-Robles, C. L., Aquino-Pérez, G., Magallanes-Quintanar, R. y Méndez-Gallegos S. de J.. 2021. Productive behavior of *Dactylopius coccus* Costa on two confined *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill cultivars. *Agro Productividad*.

14. EL NOPAL (*OPUNTIA* SPP) EN LA ALIMENTACIÓN ANIMAL

¹Mejía Haro I., ¹González Reyes M., ¹Tirado González D. N. y ²Aréchiga Flores C. F.

¹Instituto Tecnológico El Llano, Tecnológico Nacional de México. El Llano, Aguascalientes, México. km 18 Carretera Ags.-SLP, : P. 20330 El Llano, Aguascalientes, Méx. ·

²Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera panamericana tramo Zacatecas-Fresnillo, km 31.5, El Cordovel, Juchipila, Zacatecas, C.P. 98500. Méx.

Correspondencia: MHI, ORCID: 0000-0002-5425-0270, imejía@llano.tecnm.mx

Tema	Página
I. Resumen.	229
II. Introducción.	230
III. Valor nutricional del nopal.	231
IV. El nopal deshidratado en dietas de ovinos en engorda.	231
4.1 El nopal como complemento en ganado lechero.	234
4.2 El nopal utilizado en ensilaje y bloques nutricionales.	235
4.3 Enriquecimiento del nopal mediante el uso de biodigestores.	235
V. Literatura citada.	237

I. Resumen

En la alimentación animal, los forrajes juegan un papel muy importante, especialmente en México, que es un importador de granos, de los que actualmente se han elevado sus costos exageradamente. En la producción intensiva de carne y leche se han utilizado grandes cantidades de granos para lograr un crecimiento rápido y una alta producción, sin embargo, hoy en día, llega a ser incosteable utilizar dietas altas en granos, por lo que una alternativa es el uso de forrajes de calidad. Por otro lado, en la producción de forrajes, una limitante fuerte es la gran cantidad de agua que demandan y los costos tan altos de los fertilizantes. Es demandante optar por otras alternativas que ayuden a mitigar los altos costos de los alimentos y mantengan la rentabilidad de las explotaciones pecuarias. El nopal es un forraje que se utiliza desde su forma silvestre o cultivado con tecnología, aunque su uso está limitado principalmente por la gran cantidad de agua que contiene y bajo nivel de proteína, este puede ser incorporado a la dieta en concentraciones adecuadas en que no se afecte el consumo y los parámetros productivos. Por otro lado, el nopal ha sido ya enriquecido con proteína mediante el uso de bio-fermentadores y utilizado en la alimentación animal con éxito, además de su ventaja de poder llegar a producciones muy altas con menores cantidades de agua. El nopal se ha utilizado en diversas formas en la alimentación animal, desde picado fresco, deshidratado al sol, ensilado, fermentado y enriquecido, y en la elaboración de bloques nutricionales.

Palabras clave: Opuntia, rumiantes, nutrición animal.

II. Introducción

El nopal (*Opuntia* spp) es una planta forrajera que se ha distribuido en todo el mundo. En México se encuentra distribuido en el norte y centro del país. La parte norte comprende grandes regiones áridas y semiáridas, donde el clima se caracteriza por ser extremoso, con temperaturas calientes en primavera y verano y frías en invierno, y precipitaciones bajas, lo que limita a los cultivos de temporal, por lo que los terrenos en su mayoría se usan como agostaderos para la cría de ganado bovino, ovino y caprino. En estas condiciones, el nopal es una especie que se adapta con facilidad y es utilizado como forraje para el ganado, en la mayoría de las veces en su forma natural encontrada en los agostaderos (Figura 1). Por otro lado, principalmente en estados del centro del país, el nopal es cultivado y cuidado en forma intensiva para consumo humano y también como forraje para el ganado, teniendo producciones con alto tonelaje por hectárea (Figura 2).

López-González (2010) menciona que, de las 258 especies reconocidas, 104 especies del género *Opuntia* están reportadas para México, 45 taxas se encuentran en el noreste, comprendiendo 31 especies y 14 variedades. De las más comunes están *Opuntia linheimeri* que se distribuye en sus diferentes variedades en la planicie del golfo con precipitaciones de arriba de 600 mm. Mientras que en la región árida dominan las variedades de *Opuntia phaecanta*, *O. rastrera*, *O. microdasys*, *O. rufida*, *O. imbricata*, entre otras.

La producción de nopal puede ser desde en su forma silvestre, del que su uso ha sido de una manera no planeada, lo que muchas veces ha llevado a su deterioro. El nopal también es cultivado utilizando riego, fertilización, control de malezas y enfermedades, y realizando podas adecuadas, y la producción va desde 25 a 125 toneladas de forraje fresco por hectárea, dependiendo del sistema de producción (López-González, 2010).



Figura 1- Eliminación de espinas con fuego (chamuscado) del nopal silvestre en campo.

III. Valor nutricional del nopal

El contenido nutricional del nopal es variable, dependiendo de la variedad y el medio ambiente en que se desarrolle, la fertilidad del suelo o fertilización química u orgánica que se le dé y de la madurez de la penca, entre otros. En general, el contenido de agua es alto, influyendo grandemente la madurez de la penca, mientras que el contenido de proteína es bajo (Cuadro 1) en todas las variedades, siendo común el rango de 3 a 5 % en base seca, que comparado a los requerimientos de proteína de bovinos productores de carne de 12 a 13 %, de ovinos en mantenimiento de 12-14%, corderos en engorda de 13 a 17 %, y vacas lecheras de 16 a 19 %, no aporta una cantidad de proteína considerable. Sin embargo, en condiciones de sequía aporta una cantidad de agua importante, y es una fuente considerable de energía y minerales. Su contenido de fibra se reporta de alta digestibilidad.

Cuadro 1. Composición química de diferentes especies de nopal (% BS).

Especie	Materia Seca (%)	Materia orgánica (%)	Proteína Cruda (%)	EE (%)	FC (%)	MI (%)	ELN (%)
<i>O. engelmannii</i>	15.1	68.4	3.3	1.2	3.6	31.6	60.3
<i>O. ficus-indica</i>	11.3	89.9	3.8	1.4	7.6	13.1	77.1
<i>O. lindheimeri</i>	11.6	74.5	4.1	1.0	3.0	25.5	66.3
<i>O. rastrera</i>	14.4	59.9	2.8	0.8	16.2	40.1	40.2
<i>O. robusta</i>	10.4	81.4	4.4	1.7	17.6	18.6	57.6
<i>Opuntia spp.</i>	17.0	-----	5.1	1.9	13.2	20.5	59.2

EE = Extracto etéreo; FC = Fibra Cruda; MI = Materia Inorgánica; ELN = Extracto Libre de Nitrógeno. Fuentes-Rodríguez (1997).

IV. El nopal deshidratado en dietas de ovinos en engorda

Una manera de mejorar considerablemente el uso de los alimentos es conociendo y aplicando adecuadamente las propiedades nutricionales que estos ofrecen en la dieta de los animales. Una alternativa para el corral de engorda, principalmente en ovinos, es la utilización del nopal en la dieta y complementarlo con alimentos convencionales para obtener ganancias de peso parecidas a las obtenidas utilizando granos. Con el uso del nopal (Figura 3), además de sustituir granos costosos utilizados en las dietas del humano se mejora la eficiencia del uso del agua. Aunque el contenido de proteína cruda y fósforo del nopal es bajo y no cumple con los requerimientos nutricionales de los rumiantes, su contenido energético y de calcio es considerable, por lo que el uso del nopal en las dietas promete buenos resultados.

Con el objetivo de evaluar en base a la respuesta animal, el uso del nopal deshidratado en la dieta de ovinos en engorda en corral se llevó a cabo un estudio en el Instituto Tecnológico El Llano en 2004, donde se utilizaron 24 borregos machos sin castrar de un peso promedio de 29.9 kg, de raza cruzada (Dorset, Suffolk y Rambouillet) y se probó la inclusión de nopal deshidratado (Figuras 4 y 5) a la dieta en cuatro concentraciones en un diseño experimental completamente al azar con 4 tratamientos; T₀, inclusión de 0% de nopal; T₂₀, Inclusión de 20 %; T₃₀, 30 % y T₄₀, 40 % de nopal en la dieta. Las dietas se elaboraron con un 17 % de PC. Los corderos se alimentaron *ad libitum* por 62 días y se pesaron dos veces durante el periodo. Se registró el consumo de alimento, ganancia de peso y conversión alimenticia (Mejía *et al.*, 2005).

No se observaron diferencias ($P > .05$) entre tratamientos en ganancia diaria de peso, los valores fueron T₄₀ (253 g), T₀ (222 g), T₂₀ (236 g), y T₃₀ (213 g). En este estudio se mostró que dietas con el 20, 30 y 40% de nopal deshidratado en borregos de aproximadamente 30 kg de peso vivo se pueden obtener ganancias de peso similares a las obtenidas utilizando granos y subproductos y con ello contar con la alternativa de producir forraje de buena calidad nutricional en regiones semiáridas y utilizarlo adecuadamente en la engorda de rumiantes.

En un estudio con borregos cruzados de Suffolk en Aguascalientes (Ramírez, 1992) se incluyó el 30 % de nopal (Base seca) fresco y picado y se reportaron ganancias diarias de peso de tan solo 86 g, lo que pudo deberse a la falta de adaptación de los corderos y a la preferencia en la dieta. Por otro lado, en un estudio en la Universidad de Nebraska-Lincoln (Lucena, 1997) en borregos alimentados con subproductos de maíz y trigo y complementados con sebo, minerales, alfalfa y harina de sangre se reportó un promedio en la ganancia diaria de peso de 260 g y una conversión alimenticia de 4.98, estas ganancias de peso son similares a las obtenidas cuando se incluyó en la dieta 0, 20, 30 y 40 % de nopal deshidratado. Los valores de conversión alimenticia fueron de 4.6 para T₀; 4.7 para T₂₀; 5.7 para T₃₀; y 4.6 para T₄₀, valores similares a los reportados en borregos alimentados con subproductos de maíz y trigo en corral de engorda ($X = 4.98$) en la Universidad de Nebraska-Lincoln (Lucena, 1997) y a los reportados en machos Pelibuey consumiendo una dieta del 14 % de proteína cruda (4.80) y con ganancias diarias de peso de 192 gramos (Gutiérrez, 1996). El nopal deshidratado utilizado en concentraciones de 20, 30 y 40 % de la dieta de ovinos en engorda produce ganancias diarias de peso similares a dietas a base de granos y subproductos.



Figura 2. Nopal Forrajero del norte de México.



Figura 3. Pencas de nopal utilizadas para alimentar ovinos.



Figura 4. Picado del nopal.



Figura 5. Secado al sol del nopal fresco y molido.

La respuesta de los animales al consumo del nopal es variable dependiendo de la variedad utilizada, el tipo de dieta e ingredientes de esta en caso de engordas intensivas. No siempre es bien aceptado, especialmente, cuando además se ofrece un concentrado palatable. Mejía et al. (2019) alimentaron corderas en engorda con dietas conteniendo 0, 15 y 30 % (BS) de nopal fresco picado y se observó un menor consumo a medida que se aumentaba el nivel del nopal en la dieta, ya que el concentrado ofrecido era de buena calidad y palatabilidad, lo que ocasiona que los corderos tuvieran preferencia por el concentrado, esto se vio reflejado en menores ganancias de peso en corderos en corral en forma intensiva. La gran cantidad de humedad que tiene el nopal (Cuadro 2) también influye en el consumo de materia seca, ya que cuando se trata de pencas de menor edad, estas contienen más agua y posiblemente diferente sabor, lo que finalmente repercute en un menor consumo de materia seca.

Cuadro 2. Contenido de humedad de especies y variedades de nopal forrajero colectadas en Saltillo, Coah., México. (Vázquez *et al.*, 2007).

Especies	Contenido de humedad (%)	
	Máxima	Mínima
<i>O. ficus indica</i> (nopal castilla).	93	88
<i>O. cantabriginesis</i> (nopal cuijo).	84	68
<i>O. lindheimeri</i> var. Tricolor (nopal cacanao).	86	72
<i>O. lindheimeri</i> var. Subarmata (nopal cacanao).	87	76
<i>O. imbricata</i> .	84	70

4.1 El nopal como complemento en ganado lechero

No obstante que el ganado lechero es altamente demandante de energía en su alimentación, ha habido estudios donde se ha utilizado el nopal en vacas en explotaciones familiares donde las vacas no se explotan intensivamente y que, por lo contrario, en ciertos periodos del año, se sufre de estiaje por la sequía. En estas condiciones Moreno-García (2012) realizó un estudio en Jiquilpan, Michoacán, con 12 vacas en lactación seleccionadas, dividiéndolas en dos grupos con o sin complemento de nopal. La dieta consistía en pastoreo de pastos nativos *ad libitum*, más 7 kg de esquilmos de maíz por vaca/día, 5 kg de un concentrado del 20% de proteína y el complemento de 12 kg de nopal fresco picado solo para el grupo tratamiento. El estudio se llevó a cabo por 90 días y se registraron aumentos en la producción de leche de 1 kg por vaca/día en periodo de lluvias y de cerca de 3 kg en periodo de estiaje en el grupo de vacas que fueron complementadas con nopal fresco picado.

En otro estudio, González-Castañeda *et al.* (1998) sustituyeron a la alfalfa por nopal fresco picado en 0, 10, 20 y 30% (BS) en dietas integrales isoproteicas y similares en el contenido energético y reportaron una disminución en el consumo de materia seca y producción de leche a medida que se aumentó el nivel de nopal en la dieta; sin embargo, la producción de leche se incrementó por kg de materia seca consumido. Los autores concluyen que el nopal representa una alternativa en la alimentación de vacas lecheras y la concentración de nopal en la dieta más recomendable fue del 20%. La producción de leche por vaca por día fue de 24.1, 23.3, 22.5, y 20.9 para los tratamientos con 0, 10, 20 y 30% de nopal.

4.2 El nopal utilizado en ensilaje y bloques nutricionales

Una manera de suplementar al ganado es a través de la elaboración de bloques nutricionales fabricados con melaza como adherente, forrajes, una fuente de nitrógeno como la urea y sulfato de amonio, para enriquecer la mezcla, macro y micro-minerales y cemento y cal para darle fortaleza al bloque. De esta manera se logra obtener un producto con buen valor nutricional, de fácil manejo y apetecible al ganado. El nopal también ha sido utilizado con éxito en la elaboración de bloques nutricionales para suplementar ovinos. Mejía *et al.* (2011) describen la fórmula incluyendo nopal picado y fermentado (Cuadro 3).

El nopal se partió en trozos de aproximadamente 5 x 2 cm, se pasó a una cubeta de plástico, y se le añadió 3% de sorgo rolado, 3% de pasta de soya, 1.5% de urea, 0.5% de mezcla mineral para ovinos y 2% de yogurt natural como fuente de microorganismos, se dejó fermentar a temperatura ambiente por dos semanas y posteriormente fue utilizado en la mezcla para la elaboración de los bloques, que fue vertida a cajas de cartón de 30x30x15 cm y prensada manualmente, y se dejó fraguar por tres semanas, posteriormente, fueron ofrecidos a ovinos como complemento de una dieta estándar y los corderos tuvieron un consumo de 82 gramos por día del bloque y ganancias de peso similares a los del grupo testigo.

Cuadro 3. Ingredientes utilizados en la elaboración de bloques nutricionales con nopal (kg en base húmeda).

Ingredientes	Cantidad (Kg)
Nopal fermentado	25
Melaza	20
Harina de alfafa	15
Urea	4
Pasta de soya	1
Sorgo rolado	15
Mezcla mineral	5
Sal	5
Fosfato dicálcico	1
Cemento	5
Cal	4
Total	100

Otra forma en que se ha utilizado el nopal como alimento para el ganado es a través del proceso de ensilaje. Pichardo (2012) preparó el nopal combinado con una mezcla de melaza-urea en silos, fermentándolo por 30 días e integrándolo en la ración diaria de cabras de tres razas, en donde esta estaba compuesta por 325 gramos de ensilaje de nopal, 334 de ensilaje de maíz y 528 gramos de heno de triticale, todo expresado en materia seca. Se reportaron ganancias diarias de peso de 109 gramos por cabra, valor superior al grupo testigo.

4.3 Enriquecimiento del nopal mediante el uso de biodigestores

Aunque el nopal en su forma natural no es una fuente de proteína para el ganado, este se ha procesado en biodigestores de fermentación aeróbica semisólida, donde es triturado y enriquecido con levaduras y otros nutrientes minerales que a las 6 horas posteriores al

proceso de fermentación está listo para servirse al ganado ya enriquecido en proteína. Experiencias de productores de ganado ovino Dorper y Kathadin de registro del predio Virginia, en el municipio de Jerez de García Salinas del estado de Zacatecas, dan a conocer que con este proceso, se logra elevar el contenido de proteína cruda de un 4 a 5% en su forma natural a 18.6 y 23.5%, y hasta 33% (Flores-Hernández *et al.*, 2019; Zava, 2020), concentraciones superiores a los requerimientos del ganado, y de esta forma se incluye en la dieta de los ovinos en un 30 a 40% y substituye a la pasta de soya o a la alfalfa, reduciendo los costos de producción. En esta empresa cultivan en temporal adecuadamente el nopal Copena 4 (Italiano, Figura 6) el que carece de espinas, y facilita su manejo para el consumo de los animales, además de ser muy resistente al frío (-10°C); también se cultiva el nopal Chicomostoc, el cual tiene más espinas y es menos resistente al frío. La producción que se tiene es de 10 kg por planta, fertilizando con 30 ton de composta por ha y realizando podas a dos niveles.

La mezcla para preparar y utilizar en el biodigestor está compuesta por 1% de levadura *Saccharomyces cerevisiae*, 1% de urea, y 0.1% de sulfato de amonio, todo mezclado con el nopal triturado y expuesto a la fermentación con 8 ciclos de reposo (30 min) y de mezclado (45 min) en presencia de aire, y a una temperatura de 25°C y finalmente en 10 horas se obtiene el nopal enriquecido en proteína por la reproducción de las levaduras (Figura 7).



Figura 6. Nopal Copena utilizado en bio-fermentadores.



Figura 7- Nopal fermentado por levaduras usado en la alimentación de ovinos.

V. Literatura citada

- Flores-Hernández A.; Meza-Hererrea, C.; García-Herrera, G., Esquivel-Arriaga, O., Ortiz-Salazar, J. y Hernández-Bautista, C. 2019. Semi-solid fermentation of nopal (*Opuntia* spp) for use as an animal protein supplement. *Revista de Geografía Agrícola* 63:88-100.
- Fuentes-Rodríguez, J. 1997. Feeding Prickly Pear Cactus to Small Ruminants in Northern Mexico. I. Goats. *J.PAC* 2:20-24.
- González-Castañeda, F; Llamas-Llamas, G. y Bonilla-Cárdenas, J. A. 1998. Utilización del nopal como sustituto parcial de la alfalfa en dietas para vacas lecheras. *Revista Tec. Pec. De México*.
- Gutiérrez, O. E. 1996. Alimentación de ovinos. Memoria del Curso Internacional Avanzado de Nutrición de Rumiantes. UAM-AMENA.
- López-González, J. J. 2010. Uso y manejo del nopal forrajero en el noreste de México. *Revista Salud Pública y Nutrición* ed. Especial 5-2011. IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional *Producción y Aprovechamiento del Nopal y Maguey*. Univ. Aut. De Nuevo León, 12-13 Nov, 2010.
- Lucena, R. 1997. Extensive grazing and byproduct diets in beef growing-finishing systems. Ms Thesis. University of Nebraska-Lincoln. Lincoln, NE. USA. 91 p.
- Mejía, H. I., Marentes, C. A., Larios, G.R. y Mejía, H. J. 2005. Utilización de nopal forrajero en diferentes formas y concentraciones, parámetros productivos y digestibilidad in situ de ovinos. III Encuentro Nacional Académico de la Educación Tecnológica Agropecuaria. Guadalajara, Jal.
- Mejía-Haro, J.; Delgado-Hernández J. L., Mejía Haro I; Guajardo- Hernández I. y Valencia Posadas, M. 2011. Efectos de la suplementación con bloques multinutricionales a base de nopal fermentado sobre la ganancia de peso de ovinos en crecimiento. *Acta Universitaria*, 21(1):11-16.
- Mejía-Haro, I., Guadalajara-Rodríguez S. A., Ortiz- De la Rosa B., Martínez-Mireles, J. M., Marín Perales, V. M., Ramos-Davila M. y Carrillo, E. 2019. Determination of the Nutritional Quality of Prickly Pear Forage. (*Opuntia ficus-indica*) in the Diet of Ewe Lambs. *Journal of Animal and Veterinary Advances* 18(4):119-123.
- Moreno-García, A. 2012. Efecto del nopal (*O. ficus-indica*) en la dieta de ganado lechero sobre la producción y calidad de leche cruda en la región de Ciénega de Chapala. Tesis Maestría. Instituto Politécnico nacional. 49 pp.
- Pichardo, A. L. O. 2012. Suplementación de ensilado de nopal con urea y melaza para tres razas de cabras. Tesis de Maestría. Univ. Aut. Antonio Narro. Saltillo, Coah., México. 43 pp.
- Ramírez, M. J. L. 1992. Evaluación de la suplementación con diferentes fuentes de proteína en raciones a base de rastrojo de maíz y nopal en la alimentación de ovinos en sistemas agropecuarios de temporal. Tesis Licenciatura. ITA de Aguascalientes. Aguascalientes, México. 47 p.
- Vázquez, R. E., Valdez R., Gutiérrez E. y Blanco F. 2007. Caracterización e Identificación de nopal Forrajero en el Noroeste de México. VI Simposio Internacional Taller

Producción y Aprovechamiento del Nopal en el Noroeste de México. Marín, Nuevo León, 2007.

Zaba, M. O. 2020. Efectiva e innovadora alternativa. <https://youtu.be/6mk9188MKnQ> visitado el 15 de noviembre de 2022.

15. EFECTO DE LAS CONDICIONES DE SECADO POR ASPERSIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia spp.*)

¹Lara Hernández, J. J., ¹López Muraira I. G., ¹Farías Cervantes V. S., ¹Chávez Rodríguez A. y ¹Andrade González I.

¹Departamento de Estudios de Postgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Tlajomulco, Km 10 carr. San Miguel Cuyutlan, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, C.P. 45640, México

Correspondencia: AGI, ORCID: 0000-0002-4004-6308 email: iandradeg@ittlajomulco.edu.mx

Tema	Página
I. Resumen.	240
II. Introducción.	240
III. Materiales y métodos.	241
3.1 Proceso de extracción.	241
3.2 Secado de aspersión.	241
3.3 Análisis fisicoquímico.	241
3.3.1 Sólidos solubles totales y pH.	241
3.3.2 Densidad y viscosidad.	241
3.3.3 Sólidos totales y contenido de humedad.	242
3.3.4 Tamaño de partícula.	242
3.3.5 Densidad volumétrica.	242
3.3.6 Solubilidad.	242
3.3.7 Higroscopicidad.	242
3.3.8 Proteína total.	242
3.3.9 Análisis microbiológico.	242
3.3.10 Análisis estadístico.	243
IV. Resultados y discusiones.	243
4.1 Propiedades fisicoquímicas del extracto líquido de nopal.	243
4.2 Propiedades fisicoquímicas del polvo y del polvo reconstruido.	244
4.3 Tamaño de partícula.	244
4.4 Contenido de humedad.	247
4.5 Densidad volumétrica.	248
4.6 Solubilidad.	249
4.7 Higroscopicidad.	250
4.8 Análisis de los polvos de nopal reconstruido.	250
4.9 Proteína total.	251
4.10 Análisis microbiológico.	251
4.11 Conclusiones.	251
V. Literatura citada.	252

I. Resumen

El presente trabajo evaluó la influencia de la temperatura de salida del aire y las diferentes concentraciones de tres materiales de cubierta o agentes encapsulantes sobre las propiedades fisicoquímicas del extracto líquido de nopal en polvo deshidratado por aspersión. Las propiedades fisicoquímicas del extracto de los cladeolos de nopal fueron: sólidos solubles 4.27 ± 0.156 g, pH 4.53 ± 0.015 , densidad 1.02 g cm^{-3} and viscosidad 650.12 ± 5.149 cP. El análisis microbiológico fue negativo en *E. coli*, coliformes y *Salmonella*. Los agentes encapsulantes empleados fueron las mezclas de GA-MD: goma arábica y maltodextrina D10 (relación 1:1), GA-PSL: goma arábica con proteína de suero de leche (relación 1:1), PSL-MD: proteína de suero de leche con maltodextrina D10 (relación 1:1), a dos concentraciones: $1 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$ and $5 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$ con respecto al peso del extracto. Los resultados obtenidos de los polvos fueron, el contenido de humedad de 6.19 to $8.42 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$, la densidad de 0.31 to 0.44 g cm^{-3} , la higroscopicidad de 0.06 to $0.18 \text{ g agua g}^{-1}$ polvo en un ambiente de 85% de humedad relativa. El pH fue de 5.09 en contraste con el valor del pH del extracto que fue de 4.53, el tamaño de particular varió de 4.76 a $8.46 \mu\text{m}$. Los polvos reconstituidos del polvo de nopal obtenido por secado por aspersión cambió significativamente en el pH, el tamaño de particular y en la viscosidad con respecto al extracto del jugo de nopal obtenido. Por lo tanto, se concluye que la temperatura de salida del aire del secador presenta efectos significativos en la humedad final y el tamaño de partícula en los polvos obtenidos del extracto de nopal.

Palabras clave: secado por aspersión, encapsulación, extracto hidrosoluble de cladeolos, *Opuntia ficus-indica*.

II. Introducción

Se sabe que el jugo de nopal es rico en fibras insolubles y en fibra soluble en agua (mucílago) [Trachtenberg y Mayer, 1981; Cárdenas *et al.*, 1997] y, además, contiene sustancias minerales: vitaminas y flavonoides [Sánchez *et al.*, 1995; Gorbachan y Felker, 1998; Saenz, 2000]. La composición de carbohidratos del mucílago de varias especies de *Opuntia* ha sido bien establecida mediante diferentes técnicas cromatografías [Mindt *et al.*, 1975]. En general, este mucílago que es polisacárido que tiene una composición química similar a la de las pectinas y contiene proporciones variables de L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa como principales unidades de azúcar neutro, así como ácido D-galacturónico. Las diferentes especies de nopal contienen diferentes porcentajes de mucílago, por ejemplo, en *Opuntia ficus indica* el contenido total de mucílago es de $1,9 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ y para *Opuntia robusta* es de $3,3 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ (en peso húmedo). La capacidad de la *Opuntia* de retener agua en condiciones climáticas tan desfavorables se debe, al menos en parte, a la capacidad de retención de agua del mucílago [Galati *et al.*, 2003]. Por esta capacidad, el mucílago se ha utilizado como medicamento cicatrizante [Trachtenberg y Mayer, 1982].

Aunque se ha estudiado en detalle el papel fisiológico del mucílago de cactus en la planta, se sabe poco sobre las características de extracción y secado por aspersión y sus efectos sobre las propiedades funcionales especializadas como ingrediente para alimentos y otras industrias [Amin *et al.*, 1970]. Además, dado que la tecnología de secado por aspersión en combinación con otros procesos unitarios, este desempeña un papel importante a la hora de responder a las demandas del mercado de polvos, con ingredientes con una amplia gama

de propiedades funcionales. Existen trabajos que explican la influencia de las condiciones de secado por aspersión sobre las características fisicoquímicas de los componentes de los polvos de nopal sin reconstruir [Chegini y Ghobadian, 2005]. Por tal motivo, en este trabajo se presenta el efecto de la temperatura de secado por aspersión sobre las características fisicoquímicas del mucílago de nopal en polvo, así como las condiciones de procesamiento, las características de reconstitución y la calidad microbiana del polvo producido.

III. Materiales y métodos

3.1 Procesos de extracción

Un lote de cladodios (pencas) frescos de *Opuntia ficus-indica* fue proporcionado por la empresa American Alimentos S.A. de C.V., en Jalisco, México. Los cladodios se lavaron, se cortaron en cubitos e inmediatamente después se remojaron a 80 °C en agua purificada para inactivar cualquier actividad enzimática durante 20 min. El jugo con mucílago se extrajo mezclando los cladodios cortados en cubitos en agua, se filtró a través de un paño y el filtrado se re-suspendió en agua y se filtró (3 veces). El filtrado se centrifugó a 10.200 rpm y el sedimento se recogió, se suspendió y se centrifugó nuevamente (2 veces). El jugo extraído así obtenido fue congelado y descongelado, decantado y filtrado para eliminar las fibras insolubles.

3.2 Secado por aspersión

Para el proceso de secado por aspersión se utilizó un secador por aspersión a escala piloto con régimen de corriente paralelo y un atomizador giratorio (GEA NIRO modelo A/S Production minor). El jugo de cladodios extraído se descongela y se transfiere a un recipiente de acero inoxidable, donde se encapsula el jugo con una mezcladora (Glas-Col®) PRECISION STIRRER a 2000 rpm durante 20 minutos, sobre mezclas de: GA-MD: goma arábiga con maltodextrinas (1:1), GA-PSL: goma arábiga con proteína de suero (1:1), PSL-MD: proteína de suero con maltodextrinas (1:1), a dos concentraciones de 5 g 100g⁻¹ y 1 g 100g⁻¹ respecto al peso del jugo. El jugo encapsulado se secó por aspersión a 175 °C de temperatura de entrada de aire y tres temperaturas de salida de aire (80, 85 y 90 °C) y velocidad del disco de 30139 rpm. Se realizaron dieciocho experimentos diferentes de secado por aspersión más el testigo sin encapsular. Los polvos secados por aspersión producidos se recogieron y almacenaron en un recipiente de vidrio hasta su análisis. Todos los experimentos se realizaron por duplicado.

3.3 Análisis fisicoquímicos

3.3.1 Sólidos solubles totales y pH

Los sólidos solubles totales (SST) y el pH de una disolución de 1:100 fueron llevados a cabo usando un refractómetro (IROSCOPE-RAL) and potenciómetro (Thermo Orion, modelo 420), respectivamente.

3.3.2 Densidad y viscosidad

La densidad y viscosidad de las muestras húmedas y reconstituidas fueron determinadas por un picnómetro de volumen fijo y un viscosímetro Brookfield LVDVE115 con cono S62 y a una velocidad de 100 rpm, respectivamente. Todas las mediciones fueron realizadas por triplicado y se reportaron como el promedio de las tres repeticiones.

3.3.3 Sólidos totales y contenido de humedad

Los sólidos totales (ST) y el contenido de humedad de todas las muestras fueron determinados de acuerdo a la metodología de la AOAC-934.06 [AOAC, 1980] de pesos constante en una estufa a temperatura de 105°C y una humedad relativa ambiental constante.

3.3.4 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula del polvo en una solución de éter de petróleo fue medido en un microscopio óptico CARL ZEISS AXIOSTAR (40X magnificación) equipado con un micrómetro calibrado. El microscopio fue conectado a una computadora con tarjeta de adquisición de datos y un sistema de análisis del tamaño de partícula. Una gota de la solución de éter de petróleo con muestra fue colocada en un portaobjeto para separar las partículas aglomeradas para su medición individual. La media de cinco partículas fue calculada y los resultados fueron reportados en micrómetros (mm).

3.3.5 Densidad volumétrica

La determinación de la densidad volumétrica se determinó mediante el procedimiento descrito por [Goula et al., 2004]. Veinte gramos de polvo fue transferido a una probeta graduada con agitación por 10 min. La densidad volumétrica fue calculada por la división del peso del polvo entre el volumen ocupado en la probeta.

3.3.6 Solubilidad

La determinación de la solubilidad del polvo secado por aspersión fue llevada a cabo por la adición de 10 g de polvo en 200 mL de agua destilada a 25 °C [12]. La mezcla fue agitada mediante un agitador magnético (TOWNSON + MERCER, 50-60 HZ, 0.2 A) en la posición 5. El tiempo requerido para disolver el polvo en su totalidad fue registrado (min).

3.3.7 Higroscopicidad

Alrededor de un gramo de polvo fue distribuido en una caja Petri de 9 cm de diámetro cubriendo una gran parte del área superficial entre el aire húmedo y el polvo. Las muestras de cada polvo en las cajas Petri fueron colocadas en un desecador bajo las siguientes condiciones: 25°C y 85% de humedad relativa usando una solución de HNO₃. Un intervalo de 10 min fue seleccionado para obtener las cinéticas de sorción [Al-Kahtani y Hassan, 1990]. Aunque la higroscopicidad se basa en el contenido de humedad de equilibrio, para comparar higroscopicidades se determinó el aumento de peso por gramo de sólidos en polvo luego de ser sometido a la atmósfera con una humedad relativa del 85 % durante 90 min.

3.3.8 Proteína Total

La concentración de proteínas totales se determinó mediante una curva con solución estándar de BSA (Albúmina de Suero Bovino). Posteriormente lista 800 mL de solución 1/60 (13.3 mL del extracto reconstituido y 786.6 mL de agua destilada), se agregaron 200 mL del reactivo de Bradford, en tubos Eppendorf de 2 mL. La densidad óptica se midió a 595 nm, en un espectrofotómetro de UV Visible (modelo GCB Double Cintra Beam). La concentración de proteína total se estableció utilizando la ecuación obtenida en la curva de calibración con BSA [Papadakis *et al.*, 1998]. Las muestras con proteína de suero como portador restan la concentración de proteína de suero añadida.

3.3.9 Análisis Microbiológicos

Se examinaron las muestras para determinar la población microbiana. La apariencia de *Salmonella spp.* se realizó utilizando el kit TECRA, y el recuento de coliformes totales se utilizaron placas Petrifilm (3M) después de una incubación de 45 °C durante 30 min.

3.3.10 Análisis Estadísticos

Los datos fueron analizados utilizando el software estadístico *STATGRAPHICS* Plus. Todos los resultados representan las medias de tres réplicas. El análisis de varianza se calculó utilizando el procedimiento ANOVA estándar. Todos los datos se analizaron a un nivel de confianza del 5 %. Las diferencias significativas entre las medias se estimaron mediante las pruebas de rangos múltiples de Duncan.

IV. Resultados y discusiones

Las condiciones de procesamiento para todos los experimentos de secado por aspersión a escala piloto se enumeran en la Tabla 1. En todos los experimentos, el polvo de *Opuntia spp.* mostró una tendencia notable a adherirse a las superficies internas de acero inoxidable de la cámara de secado, especialmente a concentraciones de alimentación de entrada más altas ($TSS > 7,5 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$). Probablemente esto se deba a la naturaleza de los sólidos solubles. La adherencia del polvo a las paredes de la cámara de secado es un efecto comúnmente reconocido en el secado por aspersión de soluciones que contienen azúcares y otros sólidos, como jugos de frutas y productos de tomate [Brennan *et al.*, 1971; Master, 1991]. Varias sustancias amorfas solubles componen la matriz de partículas secadas por aspersión y producen aglomerados termoplásticos que tienden a adherirse a las paredes, cuando el polvo alcanza su "punto pegajoso". El "punto pegajoso" está estrechamente relacionado con la higroscopicidad, ya que aumenta rápidamente al disminuir la humedad [Huntington, 2004]. Agregar polímeros, proteínas o glucosa al alimento líquido de entrada puede superar este problema de pegajosidad del polvo; sin embargo, es necesario seguir trabajando para encontrar la mezcla ideal para la disminución de la pegajosidad.

4.1 Propiedades fisicoquímicas del extracto líquido de nopal

En el Cuadro 1 se muestran los valores medios y la desviación estándar de las propiedades fisicoquímicas del jugo de cladodios de nopal estudiados. Estos resultados son muy similares a los reportados por Rodríguez *et al.*, 2005, incluso también utilizaron jugo de nopal. Es importante mencionar que este tipo de jugo natural presenta un valor de viscosidad muy alto (870 cP), el cual, presentó una disminución cuando se agregaron agentes encapsulantes. Los valores promedios del pH (5.54) se mantuvieron durante todas las pruebas, así como los sólidos solubles (4,71 °Brix), lo que la hace muy susceptible a la invasión microbiana [Piga *et al.*, 2003]. Es importante decir que estos sólidos solubles eran más prácticos para moverse en el atomizador de secado por aspersión, pues con valores superiores a 4.71 °Brix el jugo tiene mayor viscosidad, provocando una mayor dificultad para separarse del aspersor. La densidad no cambió con la aplicación de agentes encapsulantes (1,020.00 kg m⁻³). El tamaño de partícula expresado como el tamaño medio del diámetro de partícula fue del mismo orden de magnitud para todas las muestras analizadas. Se esperan variaciones relativamente pequeñas en el diámetro de las partículas. El tamaño de partícula aumentó cuando se agregaron agentes encapsulantes.

4.2 Propiedades fisicoquímicas del polvo y del polvo reconstituido

Los resultados experimentales promedio y sus respectivas desviaciones estándar de las propiedades fisicoquímicas del polvo y polvo reconstituido se muestran en la Tabla 2;

4.3 Tamaño de partícula

El análisis de imágenes microscópicas del producto seco, mostró diferencias en las características del producto. En realidad, el tamaño de las partículas dependía de las propiedades físicas de la alimentación de entrada del secador por aspersión, la acción de atomización y las condiciones de procesamiento. Los micro-gránulos de polvo de jugo de cladodios sin encapsulados se caracterizaron por tener los tamaños de partícula más bajos: el diámetro cambia solo de 5.9 a 8.1 μm (Figura 1). Los micro-gránulos de jugo de cladodios en polvo con GA-MD en las dos concentraciones (1 g 100 g⁻¹ y 5 g 100 g⁻¹) presentaron mayor tamaño de partícula: el diámetro varía de 3.7 a 9.9 μm , donde la concentración de 5 g 100 g⁻¹ presentó el tamaño de partícula menor, 3.7 μm (Figura 2). La adición también de los medios encapsulantes GA-PLS y PLS-MD no presentaron un efecto significativo en el tamaño de las partículas de 3.6 a 9.3 μm (Figuras 3 y 4).

Los tamaños de partículas relativamente pequeños dieron como resultado densidades aparentes relativamente altas ya que la velocidad de rotación del aspersor tendía a minimizar los espacios intermedios entre las partículas y obligaba al polvo a ocupar volúmenes más pequeños [Adamiec y Mudrzejewska, 2005]. Sin embargo, el dato sobre el tamaño de partícula y la densidad aparente (Cuadro 2) no se correlaciona satisfactoriamente. Los polvos de *Opuntia spp.*, las partículas tendían a adherirse al agitarlas, dejando más espacios intermedios entre ellas, y en consecuencia, proporcionaron como resultado un gran volumen, lo que probablemente explica la variabilidad observada en el tamaño de partículas. Walton (2000) mencionó la importancia de una menor densidad aparente para introducir mayor cantidad de aire dentro del líquido con contenido de mucílago, lo que afectaría la estabilidad durante el almacenamiento de los polvos.

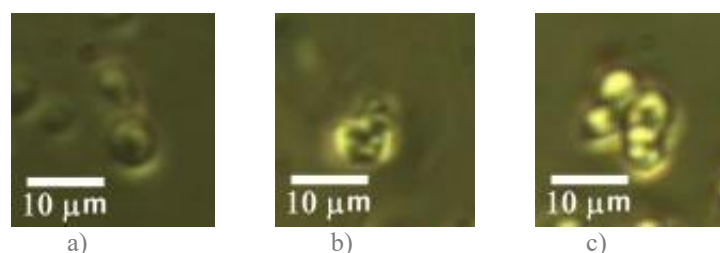


Figura 1. Micro-gránulos del extracto de mucílago de nopal en polvo sin medio encapsulante, a diferentes temperaturas del aire a la salida del secador por aspersión; a) 80 °C, b) 85 °C y c) 90 °C.

Table 1.- Physicochemical properties of the studied cladodes juice extract

Juice extract		0.1%		0.5%		0.1%		0.5%		0.1%		0.5%	
		MD-GA		MD-GA		GA-PSL		GA-PSL		PSL-MD		PSL-MD	
pH	4.44±(0.01)	4.55(±0.01)		4.56(±0.01)		4.58(±0.01)		4.57(±0.01)		4.34(±0.01)		4.37(±0.01)	
SS (%)	4.29(±0.25)	4.38(±0.09)		4.69(±0.07)		4.24(±0.01)		4.71(±0.16)		4.32(±0.05)		4.69(±0.07)	
D (g cm ⁻³)	1.02(±0.01)	1.02(±0.01)		1.02(±0.01)		1.02(±0.01)		1.02(±0.01)		1.02(±0.01)		1.02(±0.01)	
V (cP)	840.00(±8.00)	711.00(±3.00)		699.00(±3.00)		641.00(±5.00)		643.00(±6.00)		609.00(±3.00)		575.00(±2.00)	
TP (µm)	2.53(±1.77)	1.85(±0.63)		2.36(±1.28)		2.55(±1.43)		1.93(±1.41)		2.24(±1.03)		2.17(±1.25)	

Table 2.- Physicochemical properties of powder and reconstituted product

No.	Encapsulate	%	T _{out}	Moisture %	Bulk density g cm ⁻³	Solubility min	Hygroscopicity g g ⁻¹	pH	Viscosity cP	TP µm
1	GA-MD	0.1	80 °C	8.34 ± 0.46	0.44 ± 0.06	71 ± 8.0	0.08 ± 0.02	5.12 ± 0.10	57.83 ± 2.50	7.45 ± 4.87
2	GA-MD	0.1	85 °C	7.80 ± 0.33	0.39 ± 0.01	62 ± 12.00	0.09 ± 0.00	5.12 ± 0.01	60.63 ± 2.16	6.29 ± 1.62
3	GA-MD	0.1	90 °C	6.49 ± 0.76	0.41 ± 0.05	86 ± 11.00	0.12 ± 0.02	5.10 ± 0.15	63.03 ± 1.37	4.76 ± 1.21
4	GA-MD	0.5	80 °C	7.21 ± 2.67	0.41 ± 0.29	99 ± 13.00	0.16 ± 0.03	5.12 ± 0.11	46.03 ± 2.69	8.46 ± 5.07
5	GA-MD	0.5	85 °C	7.72 ± 0.41	0.40 ± 0.06	69 ± 7.00	0.13 ± 0.02	5.18 ± 0.00	42.83 ± 2.42	6.76 ± 2.99
6	GA-MD	0.5	90 °C	7.35 ± 0.49	0.42 ± 0.01	73 ± 10.00	0.15 ± 0.02	5.15 ± 0.15	44.50 ± 3.30	5.24 ± 1.21
7	GA-PSL	0.1	80 °C	8.42 ± 0.16	0.43 ± 0.01	60 ± 4.00	0.17 ± 0.02	5.19 ± 0.06	55.20 ± 1.59	6.58 ± 2.17
8	GA-PSL	0.1	85 °C	6.82 ± 0.92	0.40 ± 0.05	49 ± 6.00	0.18 ± 0.02	5.18 ± 0.18	60.63 ± 2.16	6.08 ± 1.38
9	GA-PSL	0.1	90 °C	6.63 ± 0.05	0.40 ± 0.03	69 ± 12.00	0.18 ± 0.01	5.16 ± 0.01	60.20 ± 4.25	6.15 ± 1.51
10	GA-PSL	0.5	80 °C	7.75 ± 0.74	0.38 ± 0.01	58 ± 4.00	0.15 ± 0.00	5.19 ± 0.14	44.50 ± 3.30	6.40 ± 1.57
11	GA-PSL	0.5	85 °C	6.90 ± 0.33	0.36 ± 0.06	69 ± 8.00	0.13 ± 0.01	5.23 ± 0.09	44.70 ± 1.59	5.96 ± 1.74
12	GA-PSL	0.5	90 °C	6.90 ± 1.08	0.36 ± 0.02	52 ± 8.00	0.14 ± 0.00	5.20 ± 0.14	45.40 ± 2.52	6.04 ± 1.78
13	MD-PSL	0.1	80 °C	7.63 ± 0.59	0.41 ± 0.05	71 ± 4.00	0.11 ± 0.01	5.17 ± 0.01	55.80 ± 2.38	6.51 ± 1.62
14	MD-PSL	0.1	85 °C	6.69 ± 0.27	0.38 ± 0.00	76 ± 6.00	0.12 ± 0.01	5.19 ± 0.00	53.13 ± 2.16	5.36 ± 1.76
15	MD-PSL	0.1	90 °C	6.19 ± 0.46	0.38 ± 0.11	46 ± 4.00	0.13 ± 0.00	5.14 ± 0.14	51.27 ± 1.03	6.13 ± 2.31
16	MD-PSL	0.5	80 °C	7.81 ± 0.88	0.34 ± 0.08	55 ± 6.00	0.09 ± 0.01	5.20 ± 0.13	39.07 ± 2.73	7.13 ± 3.00
17	MD-PSL	0.5	85 °C	6.41 ± 0.99	0.34 ± 0.04	70 ± 10.00	0.11 ± 0.00	5.23 ± 0.12	42.20 ± 4.25	5.84 ± 1.90
18	MD-PSL	0.5	90 °C	6.88 ± 0.84	0.31 ± 0.15	53 ± 8.00	0.09 ± 0.01	5.13 ± 0.00	40.00 ± 3.30	4.99 ± 1.13
19	WE*		80 °C	7.54 ± 0.74	0.37 ± 0.01	59 ± 5.00	0.09 ± 0.01	5.18 ± 0.14	53.80 ± 4.10	6.81 ± 1.77
20	WE		85 °C	7.53 ± 1.06	0.36 ± 0.21	50 ± 4.00	0.10 ± 0.00	5.11 ± 0.09	51.47 ± 3.26	7.16 ± 1.28
21	WE		90 °C	6.69 ± 0.40	0.36 ± 0.04	79 ± 7.00	0.09 ± 0.01	5.09 ± 0.14	54.77 ± 3.67	5.49 ± 0.60

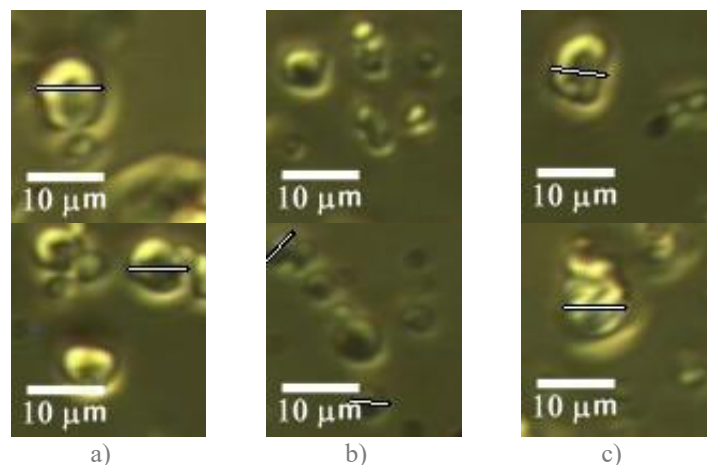


Figura 2. Micro-gránulos del extracto de mucílago de nopal en polvo con medio encapsulate GD-MD a diferentes concentraciones; 1 g 100g⁻¹ y 5 g 100g⁻¹, y temperaturas del aire de salida; a) 80 °C, b) 85 °C y c) 90 °C.

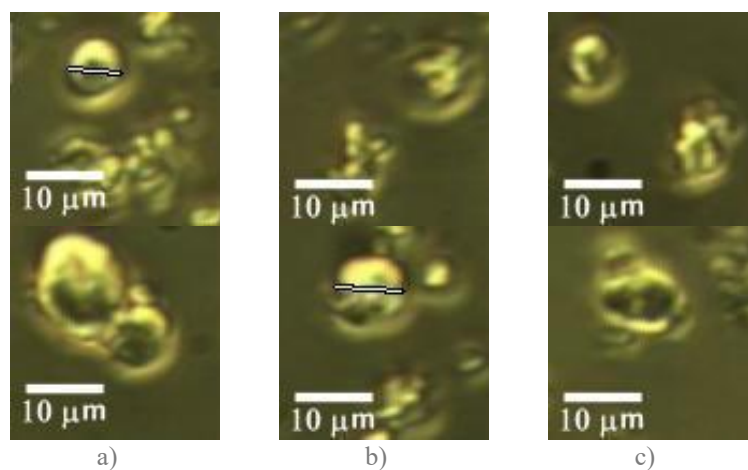


Figura 3. Gránulos del extracto de mucílago de nopal en polvo con medio encapsulate GA-PLS a diferentes concentraciones; 1 g 100g⁻¹ y 5 g 100g⁻¹, y temperaturas del aire de salida; a) 80 °C, b) 85 °C y c) 90 °C.

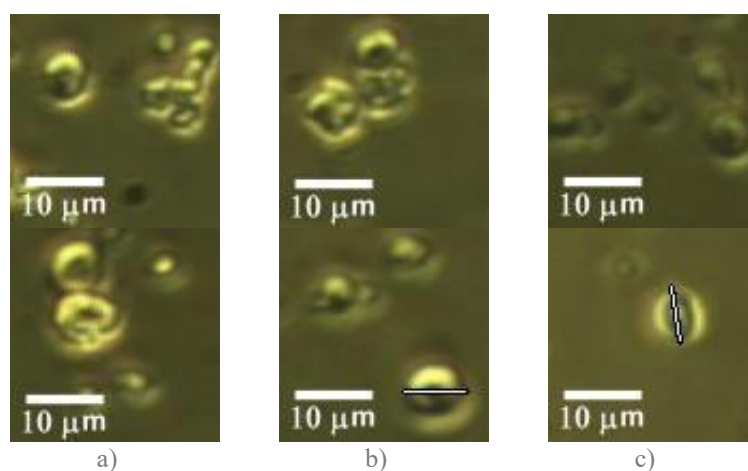


Figura 4 . Micro-gránulos del extracto de mucílago de nopal en polvo con medio encapsulate PLS-MD a diferentes concentraciones; 1 g 100g⁻¹ y 5 g 100g⁻¹, y temperaturas del aire de salida; a) 80°C, b) 85 °C y c) 90 °C.

4.4 Contenido de humedad

El contenido de humedad de los polvos de jugo de cladodio se muestra en la Figura 5 y varió de 6.19 a 8.42 g 100 g⁻¹ (base húmeda). Los datos representan los valores promedio de las tres repeticiones. Los valores más bajos de contenido de humedad en polvo se obtuvieron con 1 g 100g⁻¹ PLS-MD. La temperatura del aire de salida fue el efecto más importante sobre la humedad. Este caso se debió al aumento entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida porque cuando la temperatura de entrada aumenta también aumenta el caudal de alimentación en la aspersión, haciendo que el tamaño de la gota sea más grande. Este aumento fue de 95 °C a 85 °C. Como se puede deducir de la Figura 5, una temperatura de salida de aire más alta provoca una pequeña disminución de la humedad del polvo debido a su efecto sobre el tamaño medio de las partículas, que aumenta directamente con la velocidad de bombeo e inversamente a la temperatura de entrada [Liang y King, 1991].

Generalmente, cuando mayor sea la diferencia de temperatura entre el aire de secado y las partículas, mayor será la tasa de transferencia de calor hacia las partículas, lo que proporciona la fuerza impulsora para la eliminación de la humedad. Además, a medida que el agua sale de las partículas en forma de vapor de agua, debe ser arrastrada, o de lo contrario la humedad creará una atmósfera saturada en la superficie de las partículas que disminuirá la velocidad de eliminación de agua. En este caso, debido a las altas temperaturas entrada del aire (Tabla 2), la superficie de las partículas termoplásticas permanece plástica, lo que da como resultado que las gotas de secado se peguen entre sí y provoque una disminución de la velocidad de secado a medida que disminuye el área de la superficie. La baja velocidad de secado, junto con un menor tiempo de exposición, y una baja temperatura de salida del aire de secado provoca un aumento del contenido de humedad del polvo.

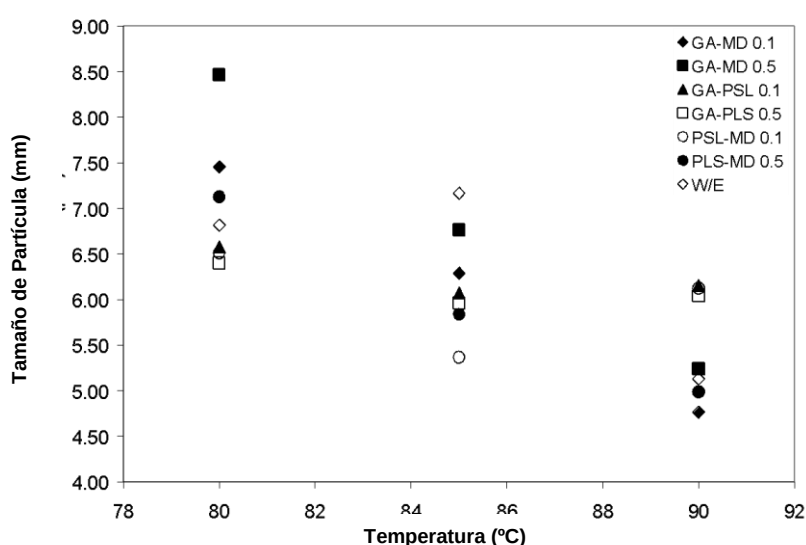


Figura 5. Contenido de humedad de los polvos del extracto de mucílago de nopal (*Opuntia* spp.) secado por aspersión (Los datos son el promedio de tres repeticiones).

4.5 Densidad volumétrica

Los resultados de la densidad volumétrica, se proporcionan en la Figura 6 con la desviación estándar promedio de las tres repeticiones, que fueron de 0.29 a 0.01 g cm⁻³. Como se muestra en la Figura 6, la densidad volumétrica del polvo es menor cuando al jugo de nopal no se le adiciona medios encapsulantes. Las partículas más pequeñas producidas con una temperatura del aire de salida más baja son más densas y, por lo tanto, la densidad volumétrica es mayor.

El aumento de las altas temperaturas de entrada del aire de secado también parece estar asociado con menores densidades volumétricas, ya que el aumento entre la temperatura del aire de entrada y la temperatura del aire de salida generalmente produce un aumento en el tamaño de las partículas y una mayor tendencia a que las partículas sean huecas [Walton, 2000]. Además, las características de la superficie de las gotas de la capa de plástico que presenta la alimentación a altas temperaturas dan como resultado una baja densidad volumétrica del producto seco. La densidad considerablemente menor de los polvos producidos a una temperatura del aire de salida de 90 °C puede deberse a una concentración más baja del medio encapsulante de PLS-MD (5 g 100 g⁻¹) [Masters, 1997].

El efecto de la temperatura del aire de salida sobre la densidad aparente del polvo depende de su efecto sobre el contenido de humedad, pero se utilizan principalmente encapsulados, ya que un bajo contenido de humedad parece estar asociado con una alta densidad aparente. En este trabajo la densidad no es muy variada para concordar el contenido de humedad debido a que su variedad con la temperatura del aire de salida no fue significativa. La adición también encapsula y las temperaturas del aire de salida tienen un efecto positivo en las características de densidad aparente con aumentos de 0.31 a 0.44 g cm⁻³.

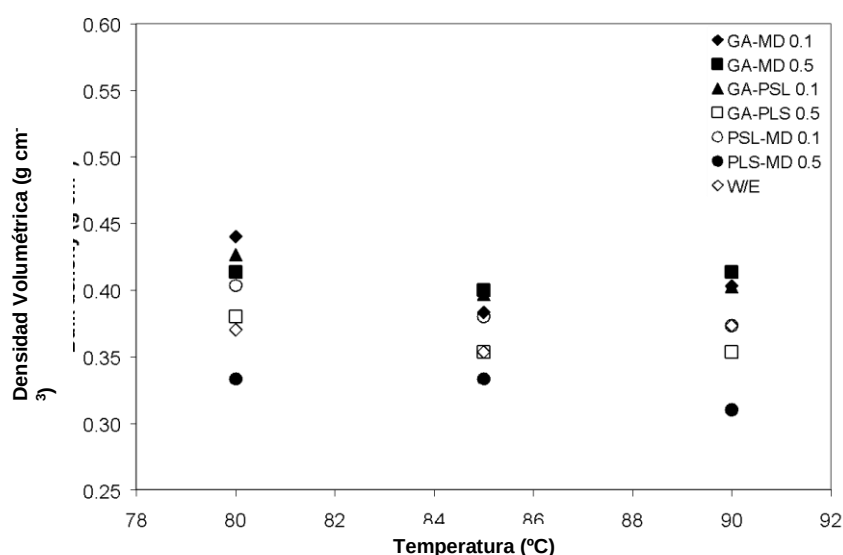


Figura 6. Densidad volumétrica de los polvos del extracto de mucílago de nopal *Opuntia* ssp. (los datos son el promedio de tres determinaciones).

4.6 Solubilidad

La Figura 7 muestra los resultados de solubilidad que varían de 46 a 99 min. Los datos representan los valores promedio de las tres repeticiones. La respetabilidad para las mediciones de solubilidad expresada como la desviación estándar promedio de las tres réplicas fue de 7 min. La solubilidad varía según los parámetros de secado.

Se encontró que el tiempo requerido para que el polvo se disuelva, aumenta con la adición de los medios encapsulantes, principalmente cuando se agrega GA-MD, debido a que el GA y el mucílago del nopal aumentan el tamaño de las partículas, provocando un aumento en la viscosidad, disminuyendo por lo tanto el tiempo de solubilidad.

La solubilidad mostró una disminución y una mayor variabilidad, con el aumento de la temperatura del aire de salida. La temperatura del aire de salida no alcanzó a provocar la desnaturalización del mucílago, por tanto, afectado la solubilidad. La solubilidad considerablemente menor de los polvos, producidos a baja temperatura del aire de salida de 80°C y sin medio encapsulante, puede deberse a la presencia de grandes aglomerados, no completamente secos dentro del flujo del polvo o a la interacción de la proteína añadida con el mucílago.

El efecto del aumento de temperatura sobre la solubilidad del polvo depende del efecto sobre el contenido de humedad, ya que un bajo contenido de humedad, parece estar asociado con la disolución de los carbohidratos. La solubilidad aumentó con el medio encapsulante de GM-MD de 62 a 99 h y disminuyó sin MD agregado de 46 a 76 h.

Los polvos secados por aspersión se disolvieron fácilmente en agua caliente a una temperatura superior a 25 °C. Los resultados de solubilidad se muestran en el Cuadro 2.

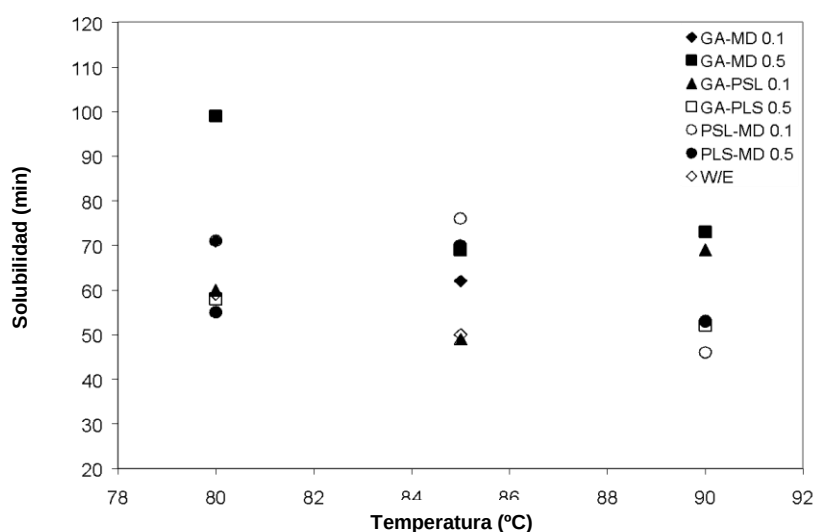


Figura 7. Solubilidad de los polvos obtenidos del secado por aspersión del extracto de mucílago de nopal *Opuntia* spp. De tres temperaturas de salida del aire.

4.7 Higroscopicidad

En la Figura 8 se muestra la adsorción de humedad de los polvos secados por aspersión a 25 °C y 8 5% de humedad relativa después de 90 minutos. Los datos representan los valores promedio de las tres repeticiones. La respetabilidad de la higroscopicidad expresada como la desviación estándar promedio de las tres réplicas fue de 0,015 g g⁻¹ de sólidos en polvo. No se encontró ningún efecto significativo de la temperatura del aire de salida, pero el tipo de mezclas encapsuladas y la concentración de maltodextrina tuvieron un efecto significativo sobre la higroscopicidad. La higroscopicidad se puede definir como una medida de la capacidad del alimento para contener humedad [Rodríguez *et al.*, 2005] y es una propiedad particularmente importante, para considerar durante el almacenamiento de los productos en polvo.

El polvo de nopal (*Opuntia* spp.) es evidentemente higroscópico, pero el polvo de tomate y roselle presenta una higroscopia más alta [Goula *et al.*, 2004; Rodríguez *et al.*, 2005]. Esto puede ser por naturaleza de cada uno de los polvos. Las partículas secadas por aspersión pueden absorber fácilmente la humedad del aire circundante y, a menos que se tomen las precauciones necesarias, la superficie del polvo se vuelve pegajosa y se aglomeran. Como se puede observar en las Figuras 6 y 8, la higroscopicidad aumenta inversamente con el contenido de humedad.

V. Análisis de los polvos de nopal reconstituidos

Para el polvo reconstituido, se determinó el pH y la viscosidad. El pH se mantuvo constante en todo el polvo, pero aumentó con respecto al pH del extracto líquido de 4.53 a 5.16. Esto puede deberse a la pérdida de ácido presente en el extracto de jugo o mucílago. Aunque se encontró un pH de 5.16 para el jugo de nopal, hubo pérdida de vitamina C [Rodríguez *et al.*, 2005]. La viscosidad también cambió con respecto al extracto de jugo. La viscosidad disminuyó de 650.12 cP a 50.67 cP. Esto puede deberse a una pérdida de interacción entre el carbohidrato del mucílago y el agua. La interacción entre los carbohidratos y el agua forma una cadena de hidrógeno.

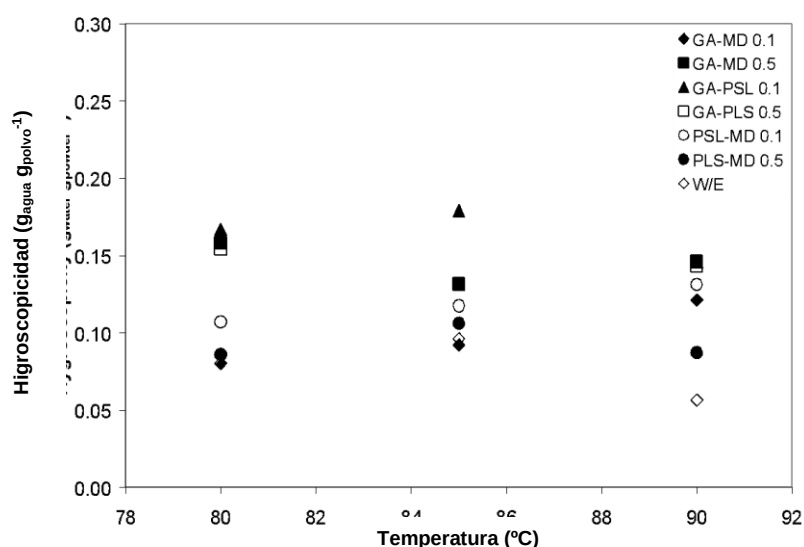


Figura 8. Resultados de la higroscopicidad de los polvos de extracto de mucílago de nopal *Opuntia* spp. a tres diferentes temperaturas de salida del aire.

5.1 Proteína total

El polvo de mucílago de nopal secado por aspersión, presenta un efecto negativo en el contenido de proteína total. El extracto líquido de nopal fresco contenía 20.511 g mL⁻¹ de proteína, pero al calentarlo a 80 °C durante 20 minutos para purificar el mucílago el contenido de proteína se disminuyó hasta 17.382 g mL⁻¹. El contenido de proteína de los polvos obtenidos del extracto de mucílago de nopal fue de 82.85 a 276.47 g por gramo de polvo seco. Esto indica, que las diferentes condiciones del secado por aspersión y los medios encapsulantes provocaron pérdidas en el contenido de proteínas. El tratamiento testigo (sin medio encapsulante) y GA-MD presentaron mayor degradación proteica. GA-PSL y MD-PSL presentan menor degradación proteica. El mejor tratamiento fue MD-PSL 5 g 100g⁻¹ probablemente debido a la interacción proteína-carbohidrato presente en el extracto y la proteína añadida de suero de leche. También se observa que a mayor temperatura del aire de salida hubo mayor pérdida de proteína, y a menor temperatura se conservó mayor cantidad de proteína, debido tal vez al tiempo de exposición de los polvos en el recipiente de recepción.

5.2 Análisis microbiológicos

El extracto líquido de nopal y los polvos secos no presentaron carga microbiana, las placas para el recuento total y las levaduras y mohos estaban libres de cualquier crecimiento microbiano incluso después de una incubación de 5 días. Estuvieron ausentes coliformes y formadores de esporas. Esto podría haber sido por la densidad y viscosidad del mucílago. Esta cualidad puede aumentar la importancia del polvo secado por aspersión para la industria alimentaria, pues representaría una prolongada vida útil de los polvos.

5.3 Conclusiones

Este estudio demostró que el secado por aspersión podría usarse para deshidratar el extracto de mucílago semi-purificado del jugo de cladodios de nopal y obtener un producto en polvo con características fisicoquímicas mejores que el jugo natural para la industria alimentaria. Este trabajo también evaluó algunos de los parámetros utilizados en el secado por aspersión como la temperatura del aire de salida y la concentración de diferentes mezclas de medios encapsulantes. El extracto de mucílago sin medio encapsulante, presentó mejores resultados como polvo solo en la composición y algunas propiedades físicas. El incremento en el intervalo entre la temperatura del aire de entrada y la temperatura del aire de salida solo presentó un efecto significativo en el tamaño de partícula, la densidad volumétrica y el contenido de humedad. Las mezclas de medio encapsulantes en los polvos reconstituidos, presentaron un mayor efecto significativo en el pH, la viscosidad, la solubilidad y la higroscopicidad. El extracto de jugo y todos los polvos secados por aspersión no presentaron presencia de colonias de microorganismos. Este trabajo puede presentar las bases para definir la optimización del proceso de secado por aspersión, y establecer nuevas estrategias para disminuir los problemas de pegajosidad en la cámara de secado y reducir la viscosidad del extracto de jugo de nopal para facilitar el bombeo al aspersor rotatorio del secador por aspersión.

VI. Literatura citada

- Adamiec, J. y Modrzejewska, Z. 2005. Some structural properties of spray-dried Chitosan microgranules. *Drying Technology*. 23: 1601–1611.
- Al-Kahtani, H. A. y Hassan, B. H. 1990. Spray drying of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract. *Journal Food Science*. 55 (4), 1073–1.
- Amin, E.S., Awad O. M. y El-Sayed M. M. 1970. The mucilage of *Opuntia ficus-indica* mill. *Carbohydr. Res.* 15: 159-161.
- AOAC. 1980. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 13th Ed.; Association of Official Analytical Chemists: Washington.
- Brennan, J. G., Herrera J. y Jowitt R. 1971. A study of some of the factors affecting the spray drying of concentrated orange juice. *Journal of Food Technology* 6, 295–307.
- Cárdenas, A, Higuera I. y Goycoolea F. M. 1997. Rheology and Aggregation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) mucilage in solution. *J PACD* 2: 152-159.
- Chegini, G. R. y Ghobadian B. 2005. Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder. *Drying Technology* 23: 657–668.
- Galati, E. M., Tripodo M. M., Trovato A, D'Aquino A. y Monforte M. T. 2003. Biological activity of *Opuntia ficus indica* cladodes II: Effect on experimental hypercholesterolemia in rats. *Pharmaceutical Biology* 41: (3) 175–179.
- Goula, A. M., Adamopoulos K. G. y Kazakis N. A. 2004. Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. *Drying Technology*, 22: (5) 1129–1151.
- Gurbachan, S. y Felker P. 1998. Cactus: New world foods. *Indian Horticulture* 43: (1) 29–31.
- Huntington, H. D. 2004. The influence of the spray drying process on product properties. *Drying Technology* 22(6), 1261–1287.
- Liang, B. y King, C. J. 1991. Factors influencing flow patterns, temperature fields and consequent drying rates in spray drying. *Drying Technology* 9 (1), 1-25.
- Masters, K. 1991. Applications in the food industry. In *Spray Drying Handbook*, 5th Ed.; Longman Scientific & Technical: New York, 587–638.
- Masters, K. 1997. Spray dryers. In *Industrial Drying of Foods*; Baker, C.G.J., Ed.; Blackie Academic & Professional: NY, 90–114.
- Mindt, L., Saag K., Sanderson G. R., Moyna P. y Ramos G. 1975. Cactaceae mucilage composition. *J. Sci. Fd. Agric* 26:(7) 993-1000.
- Papadakis, S.E.; Gardeli, C. y Tzia, C. 1998. Raisin extract powder: production, physical and sensory properties. *11th International Drying Symposium IDS '98*; Halkidiki, Greece, 1207–1213.
- Piga, A.; Del Caro, A.; Pinna, I.; Agabbio, M. 2003. Changes in ascorbic acid, polyphenol content and antioxidant activity in minimally processed cactus pear fruits. *Lebensm.-Wiss.U.- Technol.* 36, 257–262.
- Rodríguez, G. R., González Grajales R. A., Ruiz M. A. y Abud M. 2005. Spray-drying of cactus pear juice (*Opuntia streptacantha*): Effect on the physicochemical properties of powder and reconstituted product. *Drying Technology* 23: 955–973.
- Sáenz, C. 2000. Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. *J. Arid Environ* 46: 209-25.

- Sanchez, C. P., Dewey P. J. S., Solano M., Finney S., Philip W. y Jaues T. 1995. The dietary fiber content (nonstarch polysaccharides) of Mexican fruit and vegetables. *J. Food Compos Anal* 8: 284-294.
- Trachtenberg, S. y Mayer A. M. 1982. Biophysical properties of *Opuntia ficus indica* mucilage. *Phytochemistry* 21: 2835–2843.
- Trachtenberg, S y Mayer A. M. 1981. Composition and Properties of *Opuntia ficus-indica* Mucilage. *Phytochemistry* 20: 2665-2668.
- Walton, D. E. 2000. Morphology of spray-dried particles. *Drying Technology* 18 (3), 1944–1986.



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



ISBN: 978-607-7912-51-4



9 786077 912514



SNICS
SERVICIO NACIONAL DE
INSPECCIÓN Y CERTIFICACIÓN
DE SEMILLAS